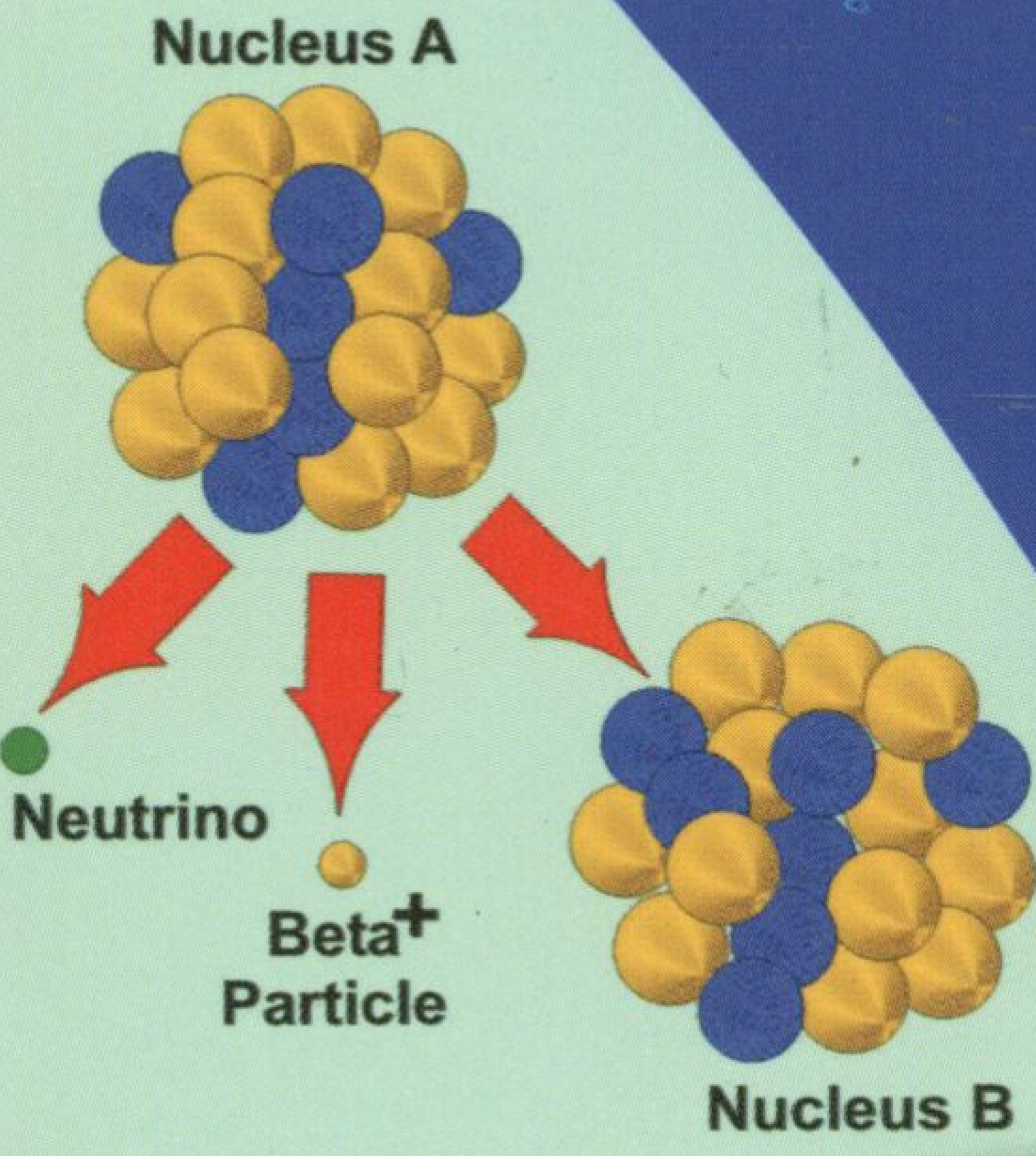
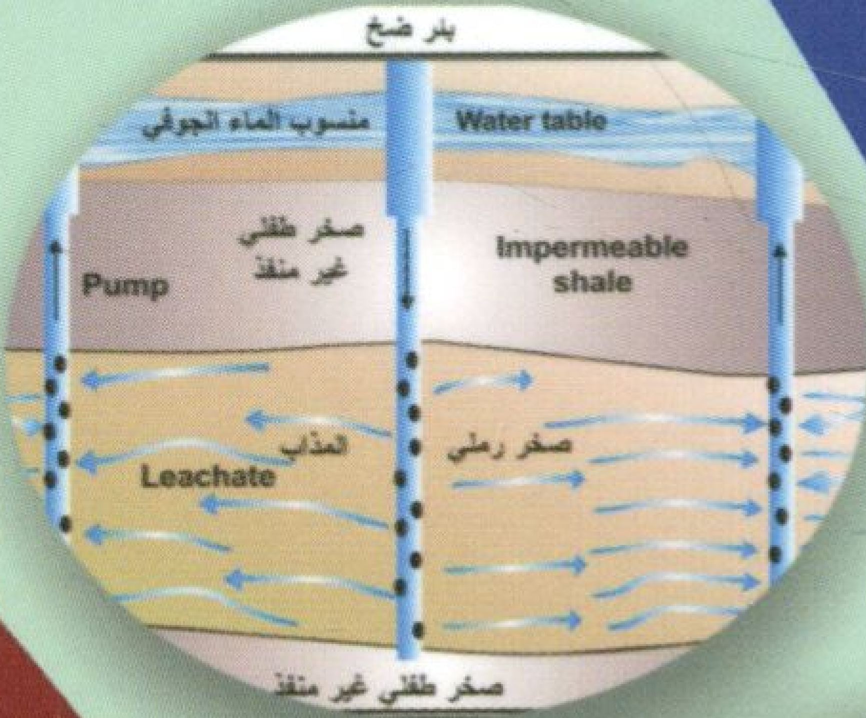
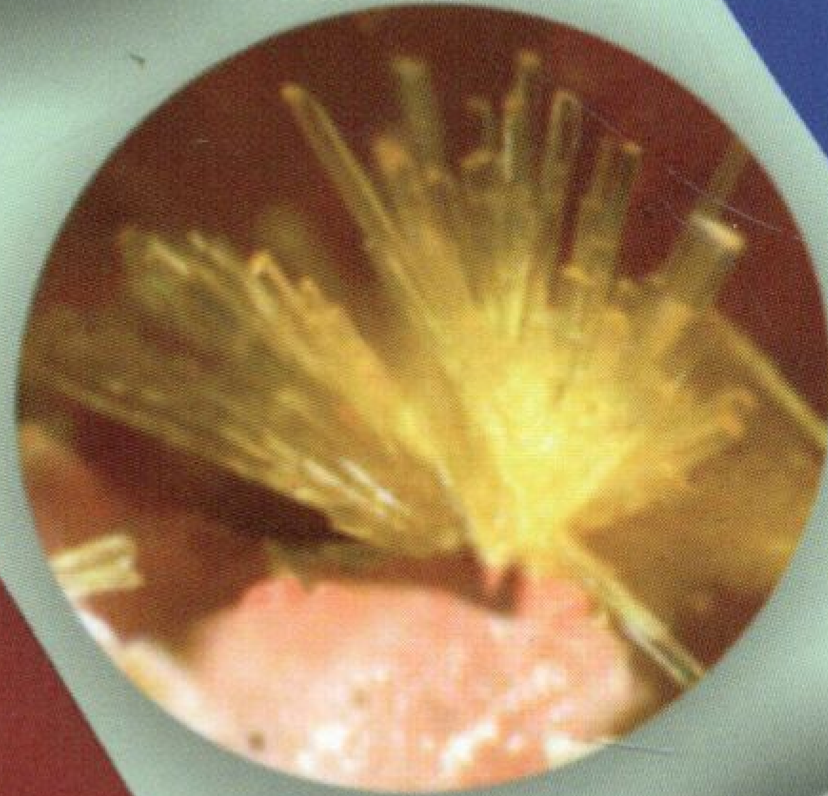
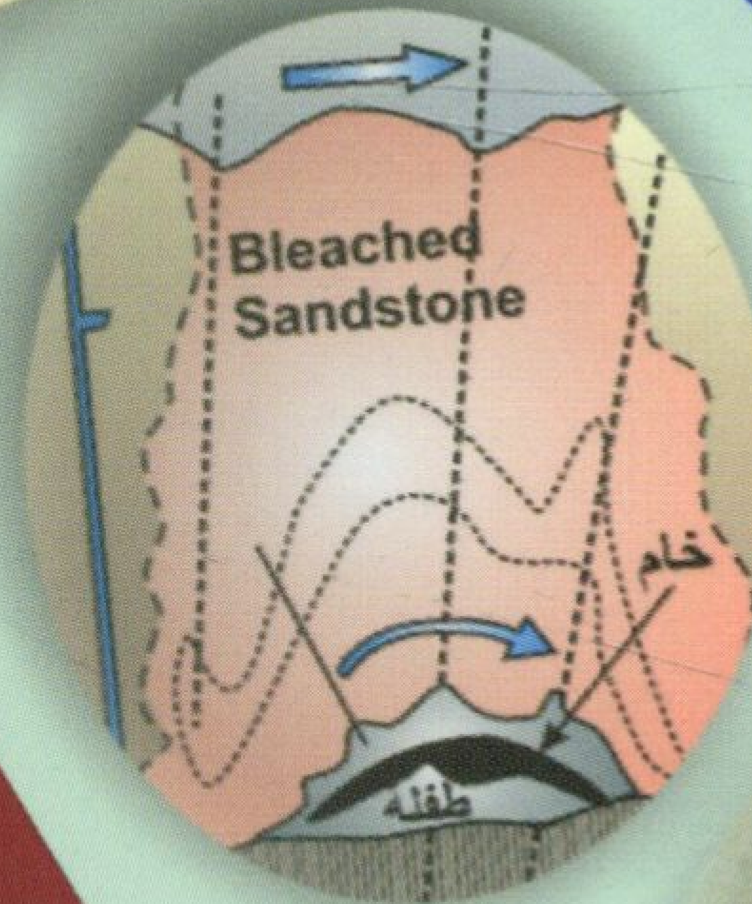
سلسلة الكتب المدعمة من عمادة البحث العلمي - ٧



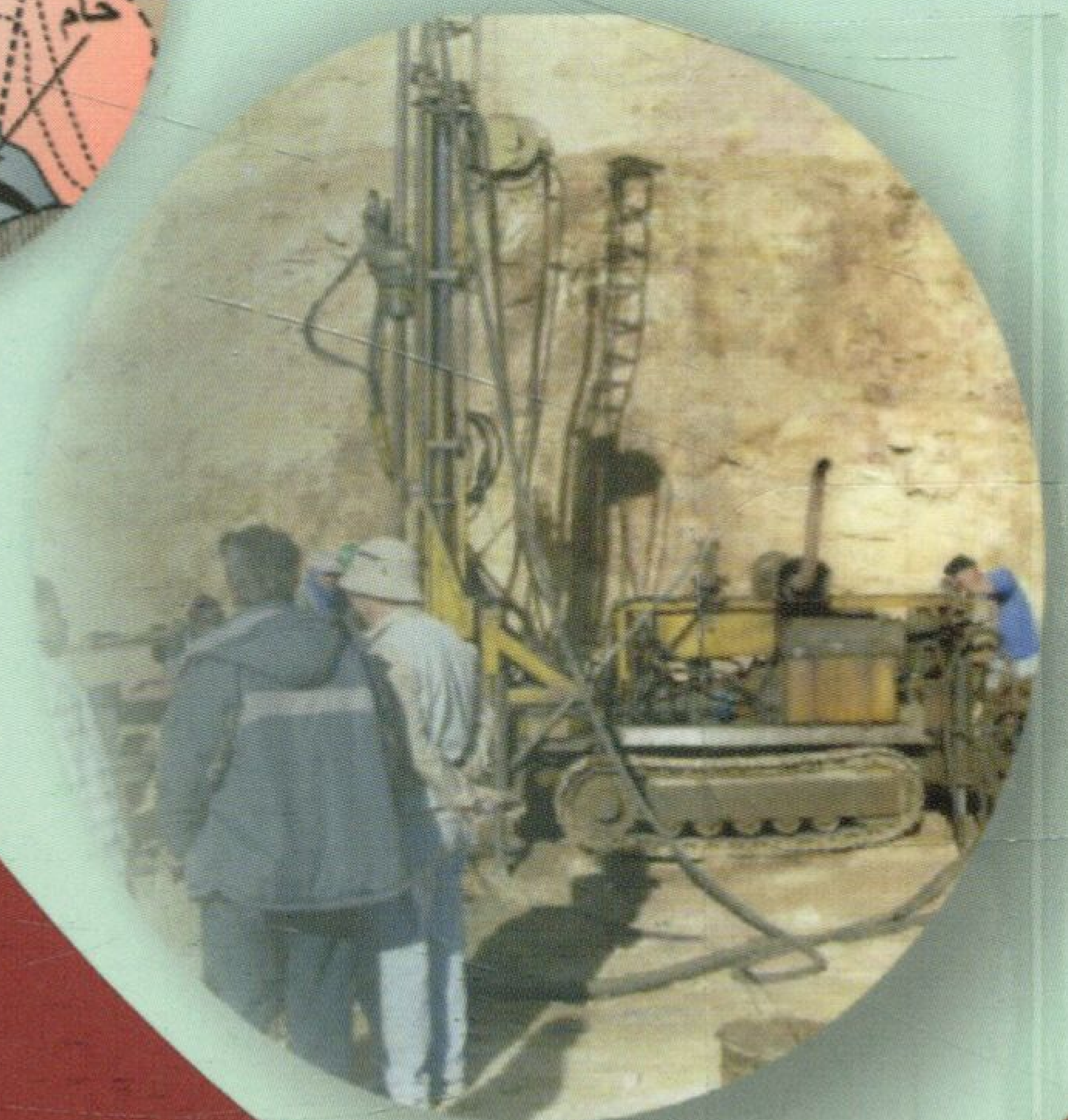
جيولوجية رواسب اليورانيوم







أ. د. حمدي حامد عبد النبي يوسف



مركز النشر العلمي
جامعة الملك عبد العزيز
جدة

بسم الله الرحمن الرحيم

جيولوجية رواسب اليورانيوم

أ.د. حمدي حامد عبد النبي يوسف

كلية علوم الأرض - جامعة الملك عبد العزيز

مركز النشر العلمي
جامعة الملك عبد العزيز
ص ب : ٨٠٢٠٠ - جدة : ٢١٥٨٩
المملكة العربية السعودية

الطبعة الأولى : ١٤٣١هـ (٢٠١٠م)

سلسلة الكتب المدعمة من عمادة البحث العلمي – ٧

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

يوسف ، حمدي حامد عبدالنبي

جيولوجية رواسب اليورانيوم. / حمدي حامد عبدالنبي يوسف .– جدة ، ١٤٣١هـ

٣١٠ ص ؛ .. سم

ردمك: ٢-٧-٥٤٧-٠٦-٩٩٦٠-٩٧٨

١- المعادن – السعودية ٢- الجيولوجيا – السعودية ٣- الرواسب

أ. العنوان

ديوي ٥٤٩,٩٥٣١ ١٤٣١/٦٣٥٢

رقم الإيداع: ١٤٣١/٦٣٥٢

ردمك: ٢-٥٤٧١-٠٦-٩٩٦٠-٩٨٧

مطابع جامعة الملك عبدالعزيز

شكر وتقدير

يتوجه المؤلف بخالص الشكر والتقدير لجامعة الملك عبد العزيز ممثلة في عمادة البحث العلمي لدعمها المادي والمعنوي في تأليف هذا الكتاب، وممثلة أيضًا في كلية علوم الأرض لتوفيرها الإمكانات المعملية اللازمة. كما أنني مدين بالشكر والتقدير لسعادة الأستاذ الدكتور أحمد الشنطي على مساهمته في مراجعة وتدقيق هذا الكتاب بأكمله.

تقديم

إن الحمد لله نحمده ونستعينه ونستهديه ونستغفره ونصلي ونسلم على سيدنا ونبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين. " سبحانك لا علم لنا إلا ما علمتنا إنك أنت العليم الحكيم ". وبعد..

لقد أدّى الاحتياج المتصاعد للطّاقة النّوويّة إلى إحياء صناعة مادّة خام اليورانيوم في كلّ أنحاء العالم، بعد انخفاض استمر لعقدين تقريبًا. ومن ثم حدث نوع من التطوير لوسائل التنقيب عن اليورانيوم فى الأعوام الأخيرة لكى تواكب متطلبات السوق المتزايدة لهذا العنصر الإستراتيجي. ومن الأشياء الأخرى التي تزيد من الطلب على اليورانيوم في الآونة الأخيرة كوسيلة من وسائل توفير الطاقة، هو أن اليورانيوم أقل سعرًا بدرجة كبيرة من مصادر الطاقة الأخرى، مثل النفط والغاز الطبيعي والفحم، وأيضًا، إلى أن الطاقة المنتجة من اليورانيوم غير مصاحبة للغاز المسبب لظاهرة الاحتباس الحراري. عمومًا، مهما بلغت الحاجة إلى اليورانيوم للأغراض المتعددة السلمية منها، والعسكرية، يدرك الجميع أن مصادره في الأرض محدودة، لذا تم التركيز على إجراء مزيد من البحث والتنقيب عن المصادر المجهولة، وخصوصًا في الدول النامية التي لم تتطرق لهذا الأمر بشكل جدي.

وفى هذا السياق، كان من الضرورى أن يتم رصد التطورات الحديثة فى مجال جيولوجية رواسب اليورانيوم، وإبراز المعلومات الخاصة بذلك باللغة العربية، حتى يتسنى لراغبي المعرفة، فهم خبايا هذا العلم. وكان ذلك هو الدافع الأساسي للمؤلف فى إصدار هذا الكتاب. ونأمل أن يفي هذه الكتاب باحتياجات الطلاب والباحثين في الجامعات، والمعاهد، والمراكز البحثية المختلفة في دراستهم لرواسب اليورانيوم.

يحتوى الكتاب على ستة أبواب. يهتم الباب الأول بإعطاء فكرة عامة عن النشاط الإشعاعي، ونظائر اليورانيوم في صورة مبسطة، يسهل بعدها متابعة الأبواب الخمسة التالية. ويتناول الباب الثاني خصائص اليورانيوم الجيوكيميائية، وسلوكه أثناء التمايز الصهيري، والتغاير بفعل المحاليل الحرمائية، وبالمياه الجوفية. ويهتم الباب الثالث بالخصائص العامة لمجموعات معادن اليورانيوم، مع وصف بعض معادنها الأكثر شيوعًا. يختص الباب الخامس بإعطاء فكرة عامة عن تصنيف رواسب اليورانيوم، ووصف رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور النارية الجوفية والبركانية، مع إعطاء أمثلة لها. ويهتم الباب الخامس بوصف رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة وعمليات التحوال. أما رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور الرسوبية فقد تم استعراضها مع بعض الأمثلة بالباب السادس. هذا والله أسأل أن يكون العمل قد استكمل فى الصورة المرجوة حتى يحقق الهدف المأمول منه.

المؤلف

يناير ٢٠١٠

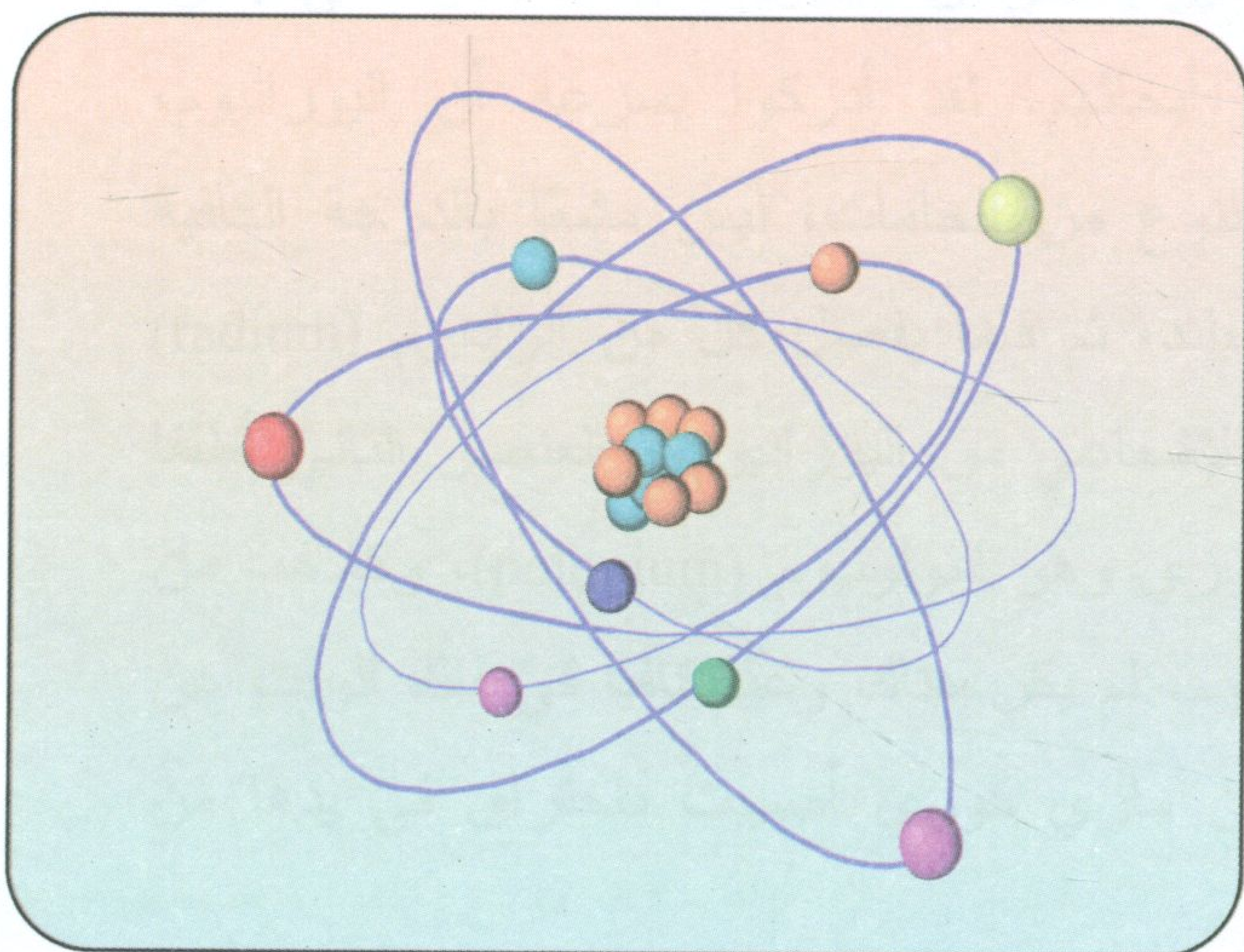
المحتـــويات

قائمة الأشكال

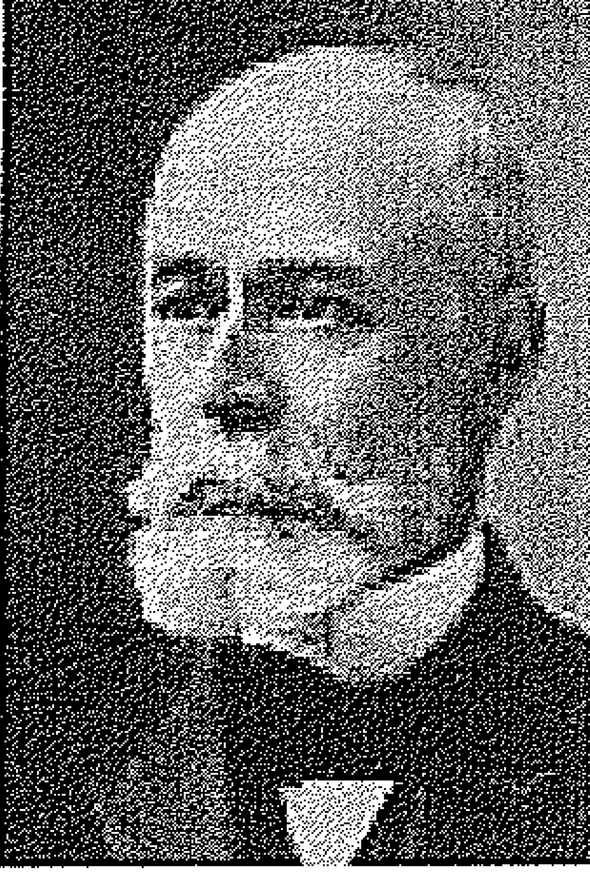
قائمة الجداول

الباب الأول
الإشعاعات وأنواعها

- مقدمة
- فكرة عامة عن النشاط الإشعاعي
- كيف تنشأ الإشعاعات
- أنواع الإشعاع
- سلسلة الاضمحلال الإشعاعي وعدم الاتزان
- مستوى الإشعاع بالقشرة الأرضية

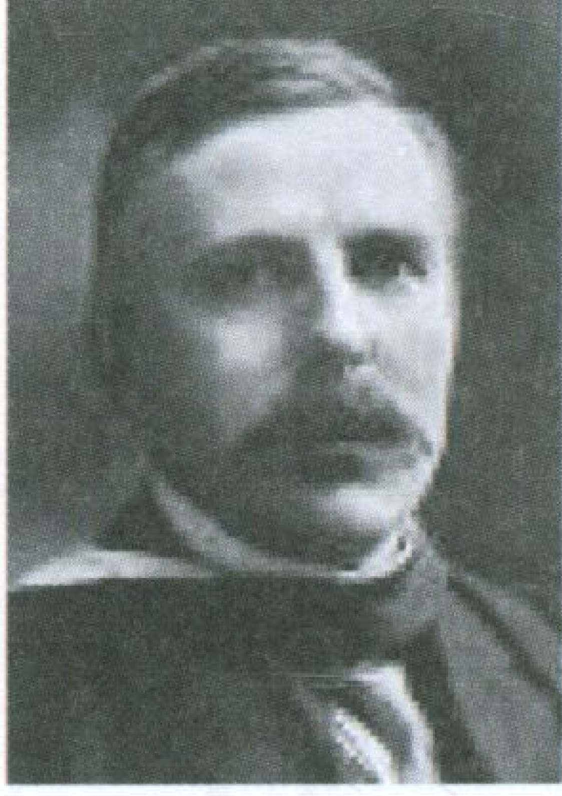


١ – مقدمة


هنري بكريل

يعود اكتشاف النشاط الإشعاعي الطبيعي إلى العالم الفرنسي هنري بكريل (Henri Beequerel) عام ١٨٩٦م، والذي لاحظ انبعاث نوع خاص من الإشعاعات من خامات اليورانيوم، لها القدرة على اختراق عدة طبقات من ورق غير شفاف، وإحداث ضباب في المستحلب المستخدم لإكساء أفلام التصوير الفوتوغرافي. لم تكن طبيعة هذه الإشعاعات واضحة في ذلك الوقت، وقد أثبت بكريل أن الإشعاع الذي اكتشفه يصدر عن جميع مركبات اليورانيوم، بما فيها اليورانيوم الفلزي، مما يعني أن مصدر الإشعاع، هو ذرة اليورانيوم. كما اتضح أن هذا الإشعاع يحدث بصورة تلقائية مستمرة، لا تؤثر عليه المؤثرات الخارجية من ضغط وحرارة. بعد ذلك، أقنع بكريل كلاً من بيير وماري كوري (Pierre and Marie Curie) بأن يقوما بدراسة المادة المشعة المفصولة من أحد خامات اليورانيوم، وهو البيتشبلند. والجدير بالذكر أن العلماء الثلاثة حصلوا على جائزة نوبل عام ١٩٠٣م عن نتائج أبحاثهم. لقد أدركوا بسرعة أن اليورانيوم، المعروف بأنه مصاحب لهذا النوع من الخامات، ليس مشعًا بالدرجة الكافية لإحداث هذه الصفات في البيتشبلند، ثم قاما بفصل كل من الراديوم (radium) وهو عنصر أقوى في نشاطه الإشعاعي من اليورانيوم، والعنصر الثاني أطلقا عليه اسم مسقط رأس ماري كوري وهو البولونيوم (polonium)، وكلاهما من نواتج التحلل الإشعاعي لليورانيوم. لم يكن هناك وعيًا كافيًا في ذلك الوقت عن أضرار المواد المشعة، حتى أن ماري كوري أصيبت باحتراق في يدها من جراء الإشعاع.

وفي عام ١٨٩٩م، قام آرنست رازرفورد (Ernst Rutherford) بإجراء مزيد من الدراسات على عينات الراديوم، التي فصلت من قبل بواسطة بيير وماري كوري، وخلص إلى أن هناك ثلاثة أنواع من الإشعاع، مختلفة في الطاقة، وهي: أشعة ألفا، وبيتا، وجاما. وقد حصل رازرفورد على جائزة نوبل عام ١٩٠٨م عن اكتشافه للغاز النشط إشعاعياً، وهو الرادون، بواسطة التحليل الطيفي.



آرنست رازرفورد

٢- فكرة عامة عن النشاط الإشعاعي Radioactivity

ينتشر الإشعاع في الطبيعة حسب تركيز النظائر المشعة في الوسط المحيط، هذا بالإضافة إلى الإشعاعات التي تصل إلينا من الفضاء الخارجي. ويوجد ثلاث مصادر للإشعاع:

(١) الإشعاعات الكونية

هي الأشعة التي تصل إلينا من الفضاء الخارجي. تحتوي هذه الأشعة على كميات مختلفة من الإشعاعات المؤينة التي منها: النيوترونات، والبروتونات، ونسبة قليلة من الأنوية الخفيفة، مثل الكربون، والأكسجين، وكذلك الفوتونات، والإلكترونات. وعند مرور هذه الإشعاعات المؤينة عبر الغلاف الجوي المحيط بالأرض، فإنها تتفاعل مع مكوناته، فتتغير محتوياتها، وتضعف كمياتها، إلى أن تصل إلى



شكل ١-١: الأشعة الكونية.

الأرض بكميات ضئيلة جدًا، ليس منها ضرر على الإنسان أو بيئته، ولهذا يُعتبر الغلاف الجوي واقيًا من هذه الإشعاعات. وتـتغير الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان من هذا الإشعاع بتغير موقعه على الكرة الأرضية، فالأشعة الكونية تقل عند خط الاستواء، وتزداد باتجاه القطبين، وعند الارتفاعات العالية من سطح البحر.

(٢) إشعاعات القشرة الأرضية

تحتوي القشرة الخارجية للكرة الأرضية على كميات ضئيلة من عناصر مشعة، مثل اليورانيوم والثوريوم. يختلف تركيز العناصر المشعة بالتربة باختلاف نوعها، فنجد أن تركيزها يزداد بالصخور الجرانيتيه، ويقل في التربة الرملية. تحتوي التربة أيضًا على نسبة ضئيلة من البوتاسيوم المشع. تتكون الإشعاعات الصادرة من التربة أساساً من إشعاعات جاما، حيث يتم امتصاص ألفا، وبيتا داخل التربة.

(٣) المواد المشعة الموجودة في الطعام وداخل جسم الإنسان

توجد بعض العناصر المشعة الطبيعية، مثل الكربون١٤ والبوتاسيوم٤٠، في طعام الإنسان، وداخل جسمه. ويوجد بجسم الإنسان أيضًا الراديوم٢٢٦، والبولونيوم٢١٠، والاسترونشيوم٩٠. وتختلف كمية الإشعاع من عضو لآخر بجسم الإنسان، فمثلاً تزداد كمية الإشعاعات الطبيعية في الرئة عنها في نخاع العظام، وتجدر الإشارة إلى أن رئات المدخنين تحتوي على قدر أكبر من المواد المشعة، وذلك بالمقارنة برئات غير المدخنين، ويعتبر ارتفاع نسبة المواد المشعة في رئة المدخن، من أهم أسباب الإصابة بسرطان الرئة.

إن تعرض الإنسان للإشعاع بمختلف مستوياته، أمر غير مرغوب فيه، لما للجرعات المرتفعة منه من تأثيرات ضارة. وحديثاً، بدأ العلماء في الاهتمام

بدراسة التعرض للجرعات المنخفضة من الإشعاع، الصادر من النظائر الطبيعية المشعة كاليورانيوم، ونواتج تحلله مثل غاز الرادون، الذي يشكل نصف معدل الجرعة الإشعاعية المؤثرة من الإشعاع الطبيعي لعموم البشر تقريباً.

يعتمد تأثير الإشعاعات على الكائنات الحية على نوعية الكائن الحي وشدة الإشعاع، والفترة الزمنية التي يتعرض لها الكائن الحي للإشعاع. يبين جدول (١-١) مدى تأثير الإشعاعات على جسم الإنسان. يختلف التأثير الإشعاعي على الجلد والأعضاء المرتبطة، حسب نوع الأشعة، ومقدار طاقتها. على سبيل المثال، يمكن لأشعة جاما اختراق الجسم من الخارج، وإلحاق الضرر بالخلايا الداخلية البعيدة. وهذا الاختراق يجعلها تشكّل خطراً خارجياً. بينما أشعة ألفا، وبيتا لا يمكنها أن تنفذ بعمق داخل الجسد من الخارج. ولكن إذا دخلت المواد التي تعمل على انبعاث أشعة ألفا، وبيتا إلى داخل الجسم ، فإن حجم وشحنة جسيمات ألفا وبيتا، تجعلها تلحق ضررًا كبيرًا بالخلايا التي تصل إليها، وهذا يجعل أشعة ألفا وبيتا تشكّل خطراً داخلياً.

جدول ١-١: مدى تأثير الإشعاعات على جسم الإنسان.

درجة تركيز الإشعاع	التأثير على الإنسان
٠- ٥٠ راد	تغير بسيط لصورة الدم
٨٠- ١٢٠ راد	٥-١٥٪ من الأشخاص يتعرضون للتقيؤ والإجهاد ولا تحدث أضرارا
١٣٠-٢٦٠ راد	تقيؤ وأعراض مختلفة مع إمكانية حدوث وفيات
٢٧٠-٣٣٠ راد	تقيؤ وأعراض مختلفة تحدث وفيات في الأسبوع الثاني وحتى السادس

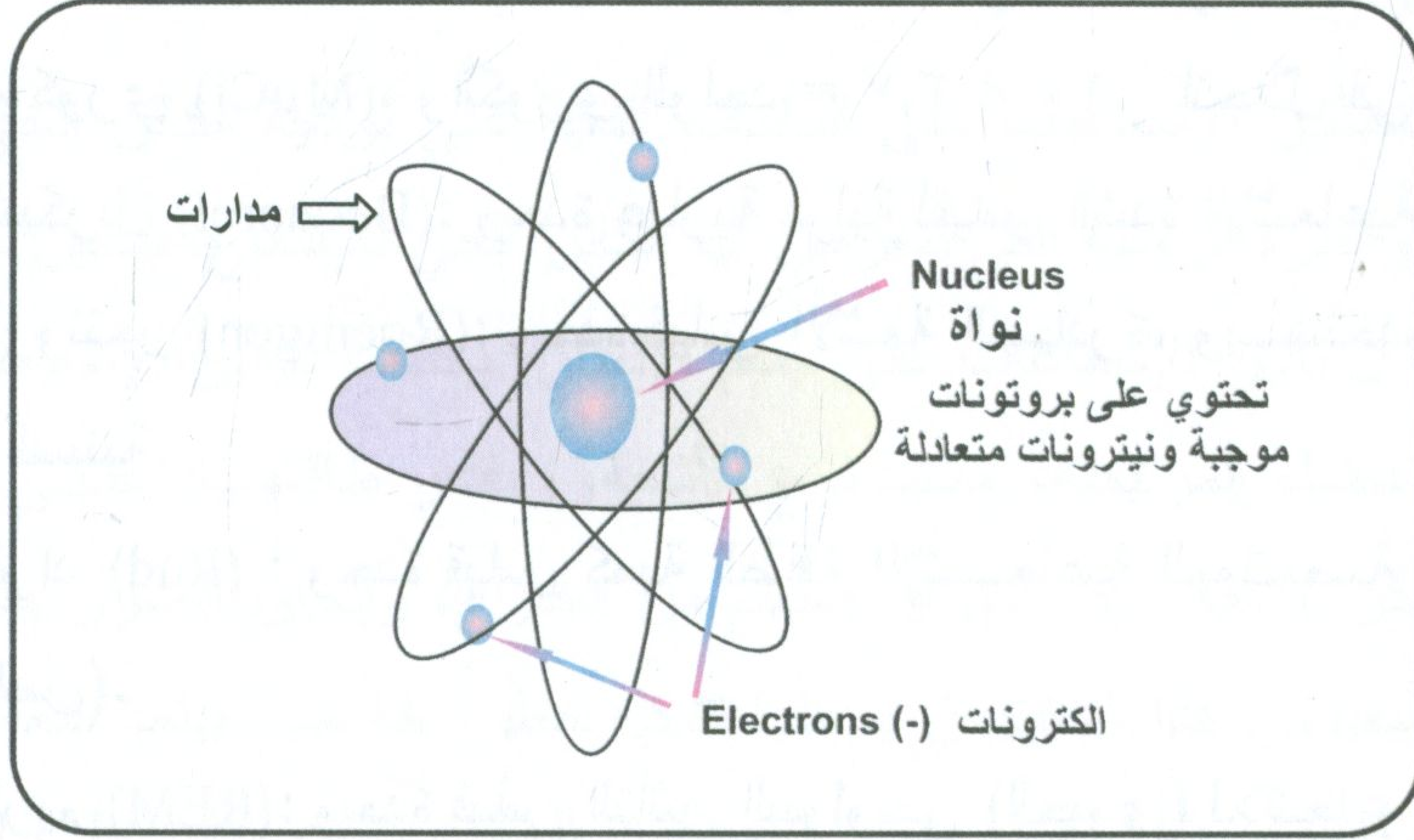
وحدات قياس الشدة الإشعاعية Units of Radioactivity

- الكوري (Curie): وحدة قياس للأشعة الصادرة، وتمثل عدد النوى المتفككة خلال وحدة الزمن، وأجزاؤها هي الميلي كوري (mCi)، والميكروكوري (MμCi)، والكوري الواحد = ٣,٧ × ١٠^١٠ انحلال في الثانية.
- البيكريل (Bequerel): وحدة عيارية دولية لقياس الشدة الإشعاعية.
- الرونتجن (Roentgen): وحدة قياس الأشعة الصادرة، ويستخدم أساساً للأشعة السينية.
- الراد (Rad) : وحدة قياس كمية الطاقة الإشعاعية الممتصة (جرعة الامتصاص).
- الريم (REM): وحدة قياس التأثير البيولوجي (الحيوي) للإشعاع الممتص.
- الجراي (Gray) " الجرعة الممتصة ": وهي تعبر عن الطاقة المنتقلة إلى وحدة الكتلة من المادة المنقولة إليها.
- السيفرت (Sievert): من أحدث وحدات قياس التأثير الناتج عن امتصاص الأشعة. يصف التأثير البيولوجي لنوع معين من الأشعة على نوع محدد من المادة، أو العضو (السيفرت = ١٠٠ ريم).

٢- كيف تنشأ الإشعاعات؟

تنبعث الإشعاعات من أنوية بعض العناصر، أو يمكن القول بعض نظائرالعناصر. تتكون ذرة العنصر من نواة مركزية تحتوي على بروتونات موجبة الشحنة، ونيوترونات متعادلة، ويدور حول هذه النواة عدد من الإلكترونات سالبة الشحنة (شكل ١-٢). يتحدد نوع الذرة بعدد البروتونات والنيوترونات التي تحتويها، فمثلاً وجود بروتون واحد في النواة، يعني ذرة هيدروجين. ويطلق على عدد البروتونات في النواة، اسم العدد الذري (atomic

number)، بينما يطلق على مجموع عدد البروتونات والنيوترونات، اسم الوزن الذري (atomic weight).



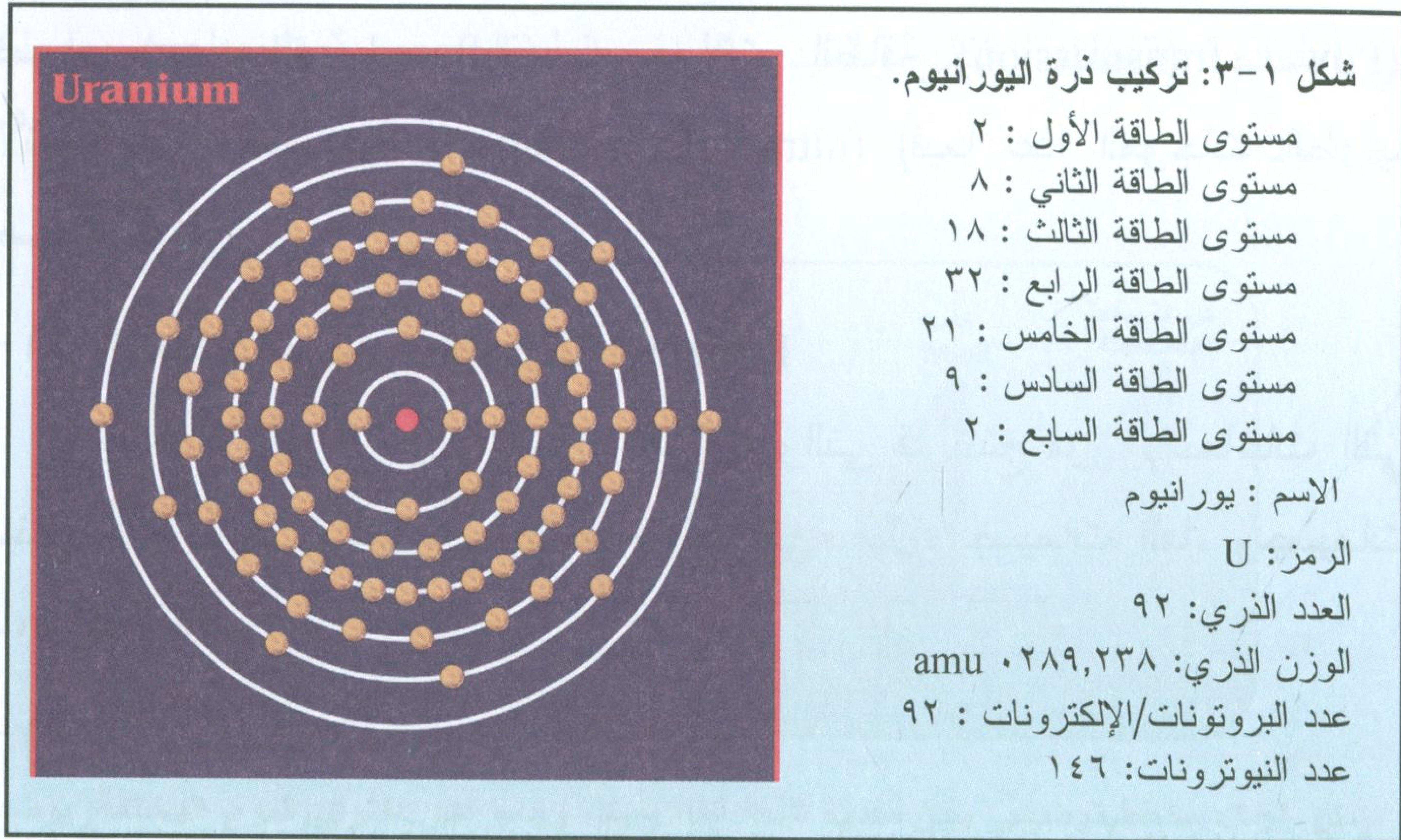
شكل ١-٢: تركيب الذرة.

يحتوي اليورانيوم في نواته علـى ٩٢ بروتـون (شـكل ١-٣)، تعمـل النيوترونات كمادة لاصقة (glue)، لكي تحافظ على كل الجسيمات سوياً. لـيس هناك قاعدة معينة عن عدد النيوترونات التـي تحتاجهـا الـذرة، ففـي حالـة اليورانيوم، فإن ذرته تحتوى على ١٤٦ نيوترون، في حين أن الهيـدروجين لا يحتوي على نيوترونات، ولكن هناك نوع من الهيدروجين يحتوي على نيوترون واحد، وفي هذه الحالة يسمى الديوتيرون (deuterium).

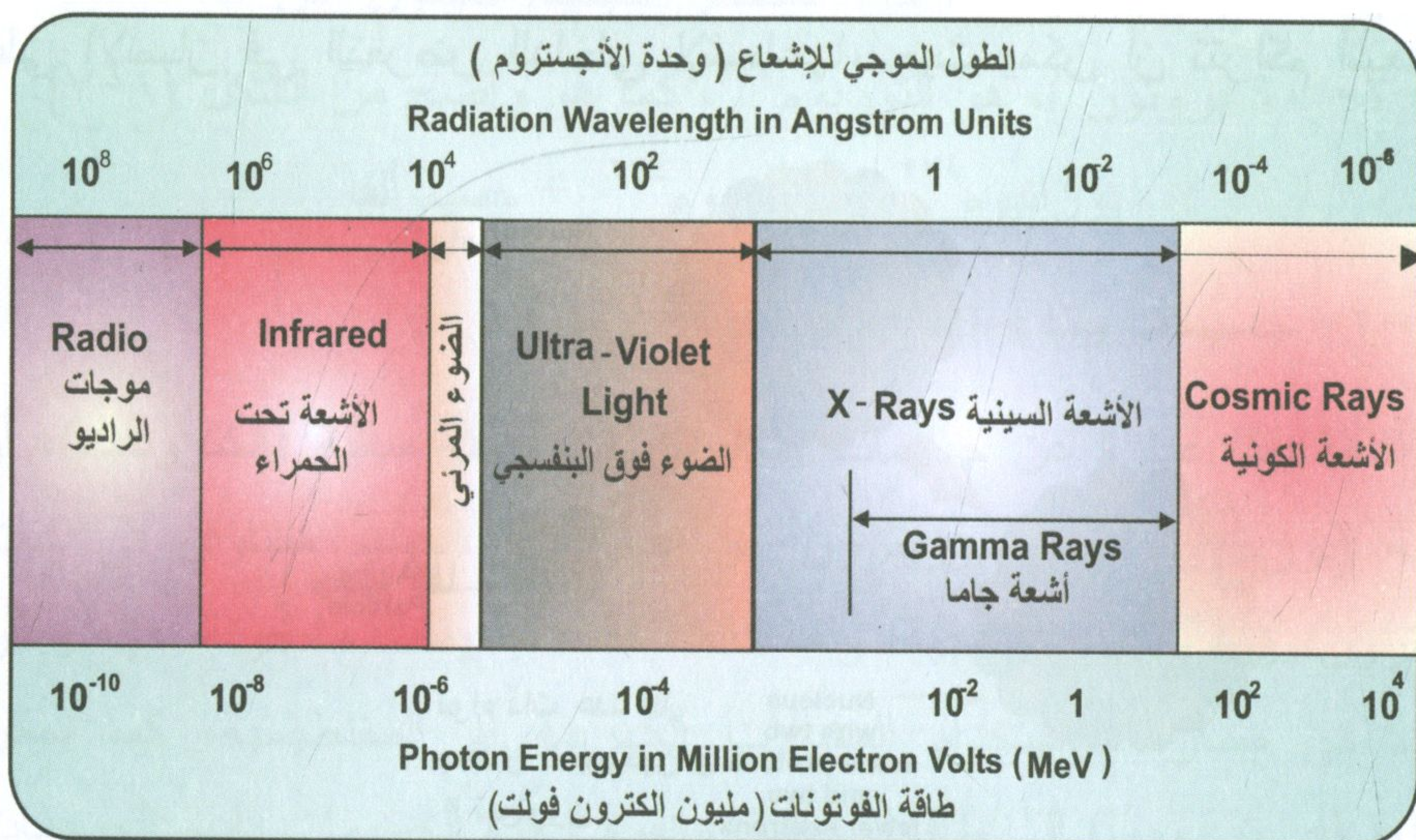
٣- أنواع الإشعاع Types of Radiation

بشكل عام، هناك نوعان من الإشعاع (شكل ١-٤):

١) إشعاع مؤين (ionizing radiation)، والذي له القدرة على تأين المادة التي يخترقها، مثل جسيمات ألفا (alpha particles)، وجسيمات بيتا (beta particles)، وأشعة جاما (gamma rays)، وأشعة إكس (X-rays).



٢) إشعاع غير مؤين (non-ionizing radiation)، والذي ليس له الطاقة الكافية لإحداث تأين للذرات (أي خروج إلكترون من هذه الذرة)، ومن أمثلة هذا الإشعاع: الميكروويف (microwaves)، والضوء المرئي (visible light)، وموجات الراديو (radio waves)، وموجات التلفاز (TV waves)، والأشعة تحت



شكل ١-٤: أنواع الإشعاعات المؤينة وغير المؤينة.

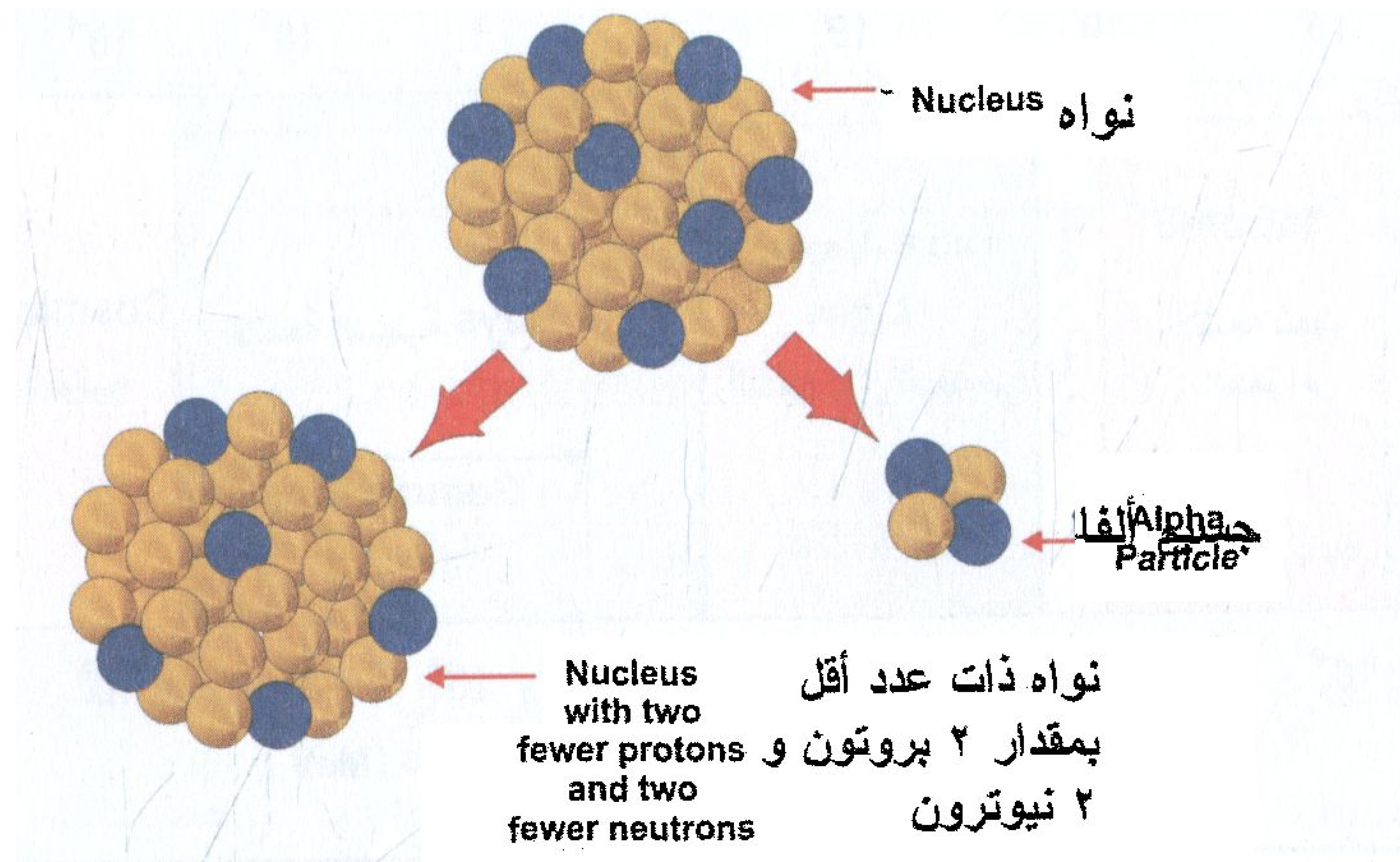
الحمراء (infrared radiation)، ومحولات الطاقة (Power transmission)، والأشعة فوق البنفسجية (ultraviolet radiation) (فيما عدا الموجات الطولية القصيرة جداً).

٣-١- الإشعاع المؤين Ionizing Radiation

توجد ثلاثة أنواع من الإشعاع المؤين، والتي قد تنتج من الإشعاعات التي يصنعها الإنسان، وكذلك من الإشعاع الطبيعي، مثل: جسيمات ألفا، وجسيمات بيتا، وأشعة جاما.

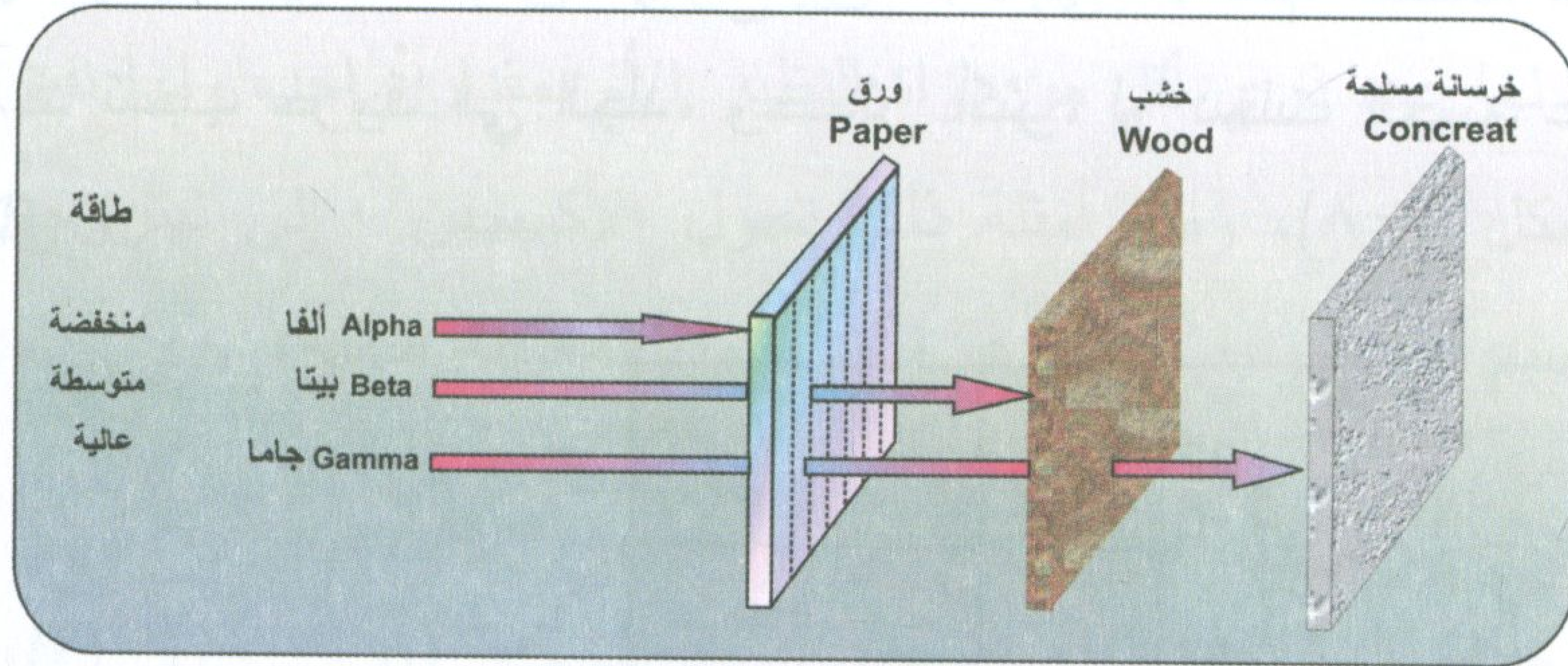
٣-١-١- جسيمات ألفا Alpha Particles

وهي تشبه نواة ذرة الهيليوم المكونة من ٢ نيوترون، و٢ بروتون، وهي بذلك عبارة عن جسيمات مشحونة موجبة الشحنة، تبلغ شحنتها ضعف شحنة البروتون (شكل ١-٥). تنبعث هذه الأشعة من أنوية الذرات المشعة، وتمتلك قدرة فائقة على تأين ذرات أخرى، ولكنها ضعيفة يمكن إيقافها بواسطة قطعة من الورق العادي، أو المقوي، أو الجلد الخارجي للإنسان (شكل ١-٦). تنتقل طاقة جسيمات ألفا مسافات قصيرة جداً (١٠سم في الهواء)، وتكمن خطورتها على الإنسان في التعرض الداخلي لإشعاعها، حيث يمكن أن تتراكم أشعة ألفا



شكل ١-٥: اضمحلال ألفا، حيث تفقد نواة عنصر ما عدد ٢ بروتون و٢ نيوترون.

في الأنسجة (العظام والكلى والكبد والرئة والطحال) مسببة تلف محدود، ولكنه شديد جدًا.



شكل ١-٦: مخطط توضيحي يبين مقدرة أشعة ألفا، وبيتا، وجاما على اختراق المواد المختلفة. يوضح الشكل أن أشعة ألفا يمكن إيقافها بقطعة من الورق، بينما جسيمات بيتا تستطيع اختراق الورق، ويمكن إيقافها بقطعة من الخشب، ولكن تستطيع أشعة جاما اختراق الورق والخشب، ولكن من الممكن إيقافها بحائط خرساني.

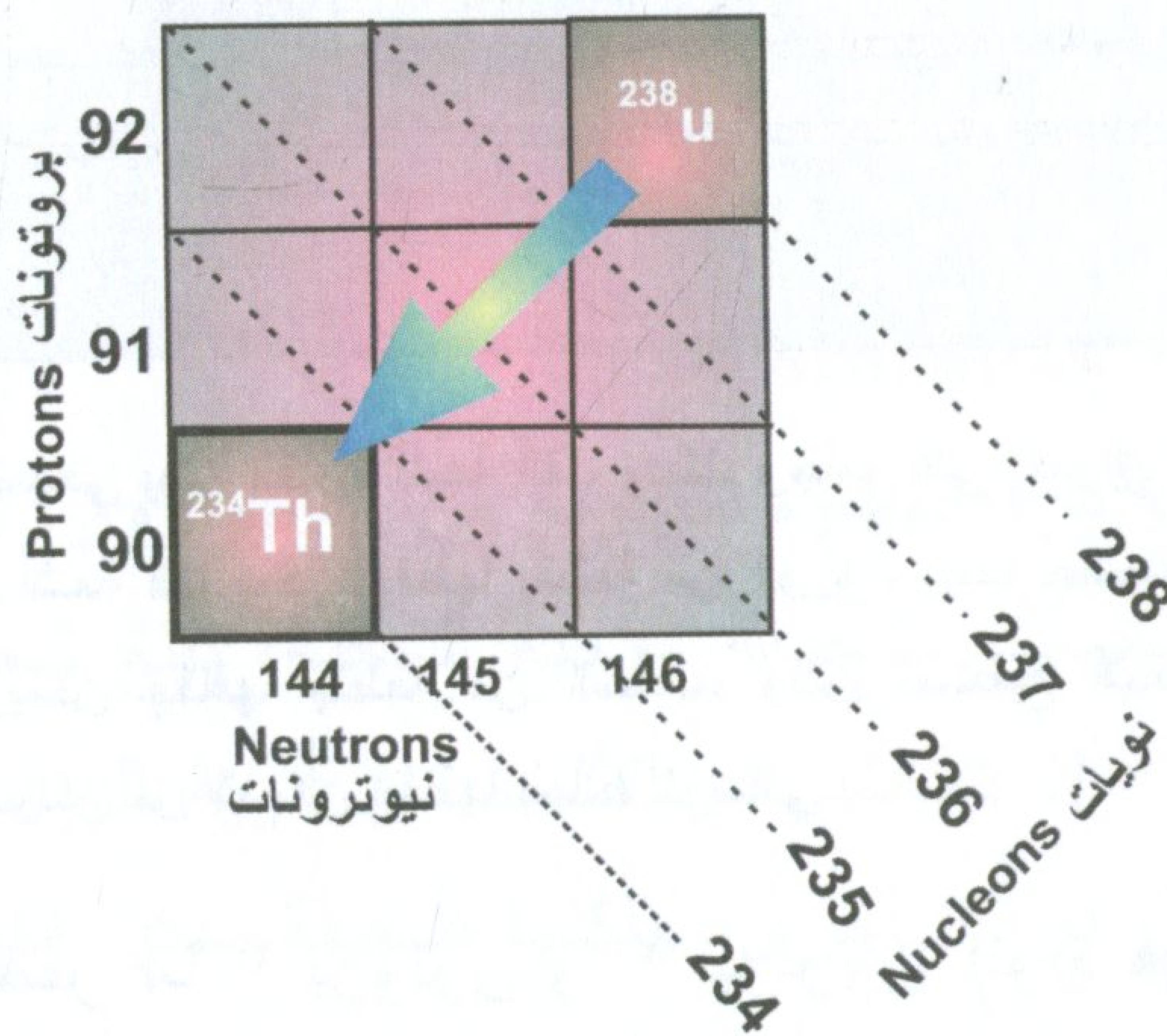
عندما يفقد عنصر ما ٢ بروتون و ٢ نيوترون (نواة هيليوم)، فإن عنصرًا جديدًا يتكون، وينقص به عدد البروتونات بمقدار ٢، وعدد النيوترونات بمقدار ٢. وفي حالة اليورانويم^{٢٣٨}، فإن العنصر الجديد المتكون عن فقد جسيم ألفا (٩٢-٢= ٩٠ بروتون)، هو الثوريوم^{٢٣٤}، كما هو واضح من الشكل (١-٧):

يورانيوم^{٢٣٨} ⟵ ثوريوم^{٢٣٤} + جسيم ألفا

٣-١-٢- جسيمات بيتا Beta Particles

أشعة بيتا عبارة عن جسيمات صغيرة ذات شحنة سالبة (إلكترونات)، أو موجبة (بوزيترونات). والبوزيترون هو عبارة عن جسيم مساوي في كتلته للإلكترون، ولكن شحنته موجبة، ولما كانت هذه الجسيمات مشحونة، فإنه يمكن التحكم في مسارها باستخدام المجالات الكهربية أو المغنطيسية، كما يمكن تعجيلها (أي تسريعها) إلى طاقات عالية، وتعرف هذه الجسيمات باسم الجسيمات

الخفيفة، ولها مقدرة على إحداث تأين أقل من جسيمات ألفا، ولكنها أقدر على اختراق الأجسام (انظر شكل ١-٦)، ويمكن إيقاف حركتها بلوح من الخشب، حيث إن قدرتها على الاختراق تتراوح بين ٠,٢ إلى ١,٣سم، اعتمادًا على مقدار طاقتها. قد تسبب حروقًا في الجلد، وخسائر أكثر، لو دخلت الجسم عن طريق الاستنشاق.



شكل ١-٧: اضمحلال ألفا.

هناك نوعان من اضمحلال بيتا (beta decay)، يسمى النوع الأول باضمحلال بيتا السالب (β^-)، وينشأ عن اضمحلال نيوترون بنواة النظير الأم غير المستقرة إلى بروتون، مع انبعاث إلكترون بطاقة عالية. وبذلك تنتج نواة وليدة لها عدد ذري أكبر من نواة النظير الأم بمقدار واحد، بينما يبقى الوزن الذري كما هو (شكل ١-٨). ومن أمثلة ذلك تحول الكربون[١٤] إلى نيتروجين[١٤]، مع انبعاث جسيم بيتا السالب كما هو واضح من المعادلة التالية:



$$^{14}C_6 \longrightarrow {}^{14}N_7 + {}^{0}e_{-1}\ (\beta^-)$$

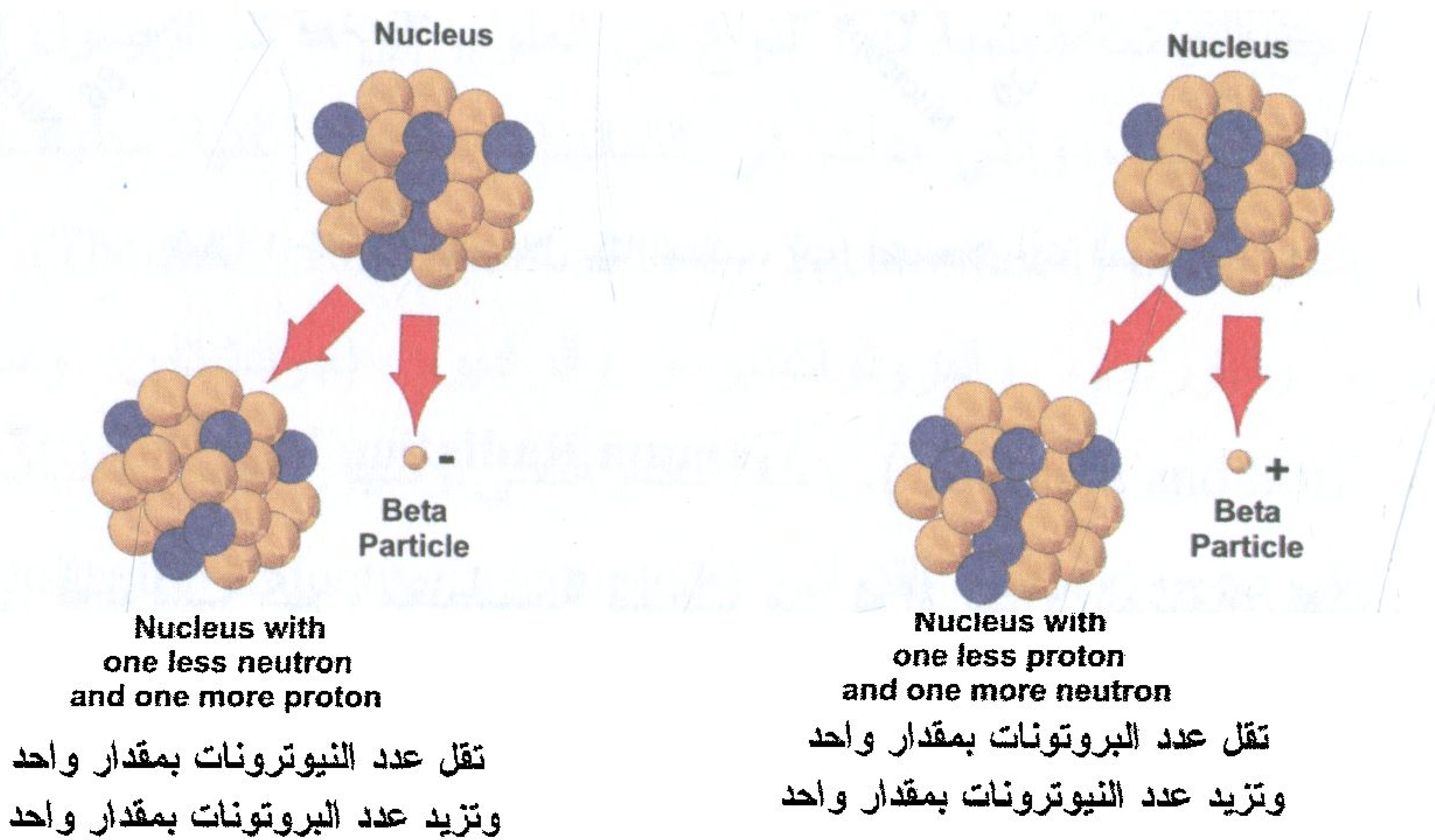
تصبح المعادلة السابقة متزنة من حيث عدد الشحنة (٦ = ٧+(-١))، والعدد الذري (١٤= ١٤ + ٠).

ويسمى النوع الثاني باضمحلال بيتا الموجب (β^+)، والذي ينتج عن اضمحلال بروتون بنواة النظير الأم إلى نيوترون، مع انبعاث جسيم يشبه الإلكترون، ولكن يختلف عنه في الشحنة. ينتج عن هذا النوع من الاضمحلال نواة وليدة لها عدد ذري أقل من نواة النظير الأم بمقدار واحد، ولها نفس الوزن الذري (شكل ١-٨)، ومن أمثلة ذلك تحول الأكسجين^{١٥} إلى نيتروجين^{١٥} مع انبعاث جسيم بيتا الموجب، كما هو واضح من المعادلة التالية:



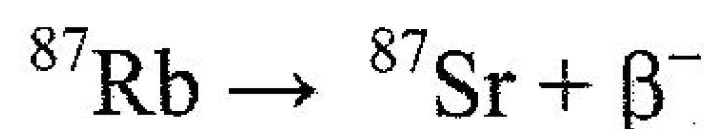
$$^{15}O_8 \longrightarrow {}^{15}N_7 + {}^{0}e_{+1}\ (\beta^+)$$

تصبح المعادلة السابقة متزنة من حيث عدد الشحنة (٨ = ٧+(+١))، والعدد الذري (١٥= ١٥ + ٠).



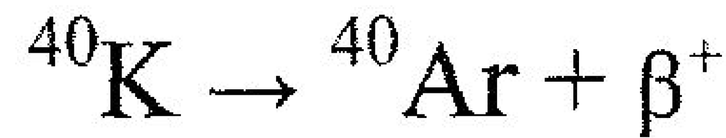
شكل ١-٨: اضمحلال بيتا.

ومن الأمثلة الأخرى لاضمحلال بيتا، نظير الروبيديوم^{٨٧}، الذي يعطي السترنشيوم^{٨٧}، مع انبعاث جسيم بيتا السالب (شكل ١-٩أ):

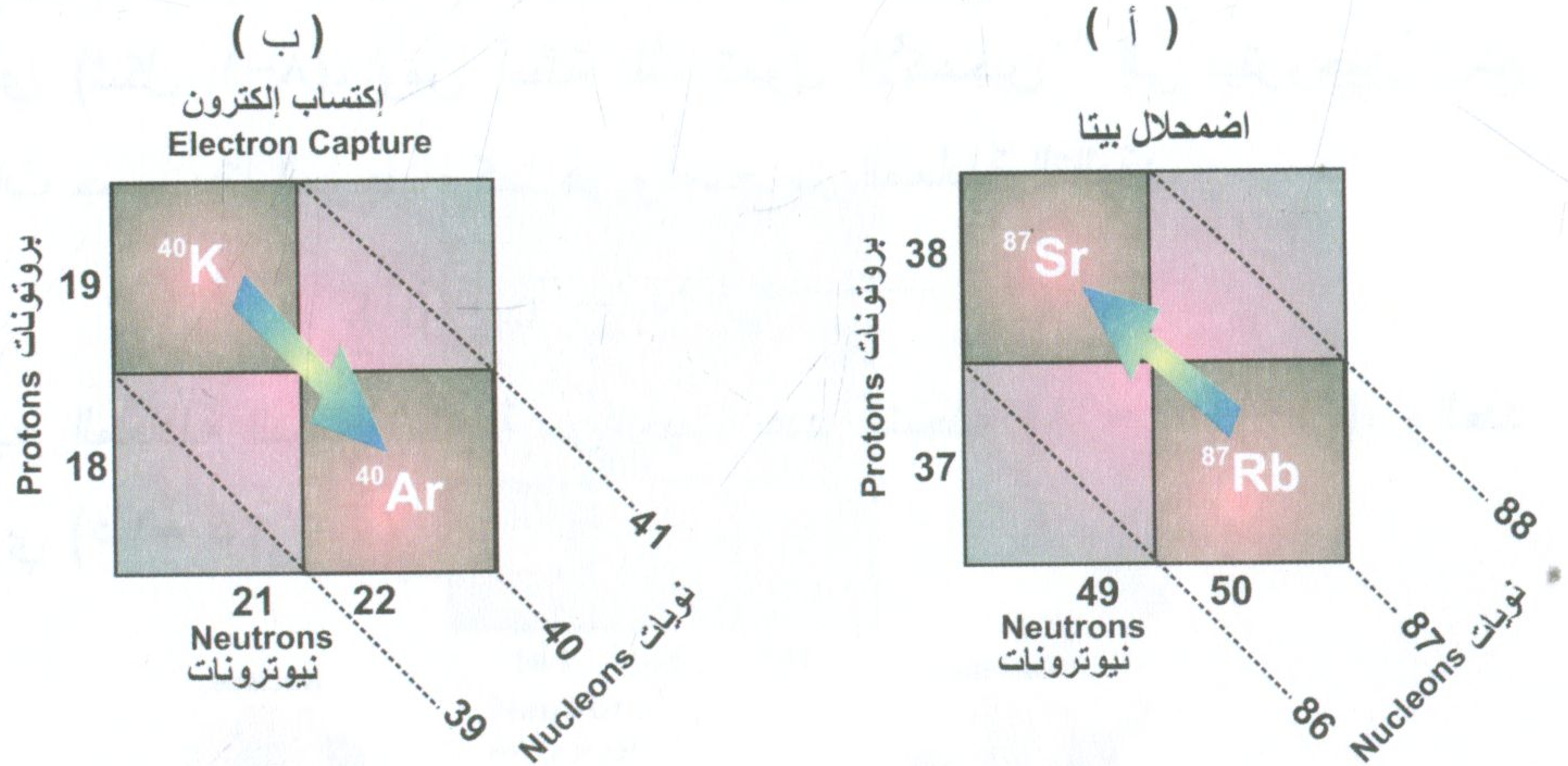


$$^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr + \beta^-$$

ومن أمثلة انبعاث جسيم بيتا الموجب (β^{+})، هو اضمحلال البوتاسيوم^{٤٠} ليعطي أرجون^{٤٠} (شكل ١-٩ب).



$$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ar + \beta^{+}$$



شكل ١-٩: (أ) اضمحلال بيتا السالب، (ب) اضمحلال بيتا الموجب.

٣-١-٣- أشعة جاما Gamma Radiation

هي فوتونات كهرومغنطيسية تنبعث من نواة الذرة المشعة، تمتاز بقدرتها العالية على اختراق الأجسام، ولإيقافها نحتاج لصفيحة من الحديد سمكها ٣٠سم، أو الرصاص، أو الخرسانة المسلحة (شكل ١-٦). عندما تنبعث جسيمات ألفا وبيتا من أنويه الذرات، فإن الجسيمات المتبقية تكون في حالة مثاره (excited state). ويعني هذا أن طاقة النواة تكون أعلى من طاقتها في الحالة المستقرة، وبالتالي فإنها تميل إلى إعادة ترتيب نفسها، وتتخلص من الطاقة الزائدة بها عن طريق إصدار إشعاعات كهرومغنطيسية تمثل أشعة جاما. تشبه أشعة جاما أشعة إكس، وليس لها شحنة.

٤- سلسلة الاضمحلال الإشعاعي وعدم الاتزان

Decay Series and Disequilibrium

تحتوي سلاسل الاضمحلال الإشعاعي لليورانيوم والثوريوم، على نظائر مشعة للعديد من العناصر، مثل اليورانيوم، والثوريوم، والبروتواكتنيوم، والراديوم، والرادون. تختلف هذه العناصر فيما بينها في صفاتها الجيوكيميائية، وأيضًا في فترات نصف أعمارها، يسمح ذلك بدراسة العمليات الجيولوجية لفترات، تتراوح بين أيام إلى مئات الألوف من السنين. تعتبر تطبيقات جيوكيميائية سلسلة اليورانيوم من العلوم الحديثة، حيث تم تلخيصها عام ١٩٨٢ و ١٩٩٢م بواسطة إيفانوفيش وهارمون (Ivanovich and Harmon) في عددين، بعنوان "عدم الاتزان في سلسلة اليورانيوم، وتطبيقات لعلوم الأرض والبحار والبيئة". ترجع النهضة العلمية لهذا النوع من العلوم، إلى ما تم الوصول إليه من تقنيات معملية حديثة، والتي بدأت في الثمانينات بظهور تقنية مطياف الكتلة الأيوني الحراري (Thermal Ionization Mass Spectrometer) لقياس اليورانيوم، والثوريوم، والبروتواكتنيوم، والراديوم (جولدشتاين وستيرلينج Goldstein and Stirling, 2003). ومع التقدم التقني وظهور جهاز مطياف الكتلة البلازمي المزدوج والمتعدد القنوات (Multi-collector inductively coupled plasma Mass Spectrometer, MC-ICP-MS)، أمكن الوصول إلى درجة حساسية ودقة قياس عالية لسلاسل اليورانيوم.

ينتج الاضمحلال الإشعاعي عن إصدار جسيم ألفا، أو بيتا، أو فوتون من نواة غير مستقرة. قبل اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي، كان يعتقد أن لكل عنصر من عناصر الجدول الدوري، حالة واحدة يظهر عليها، ويتحدد بها مكانه في هذا الجدول. ولكن تغير الحال بعد اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي، وتبين أن العنصر يمكن أن يتواجد في أكثر من حالة، حسب عدد النيوترونات في

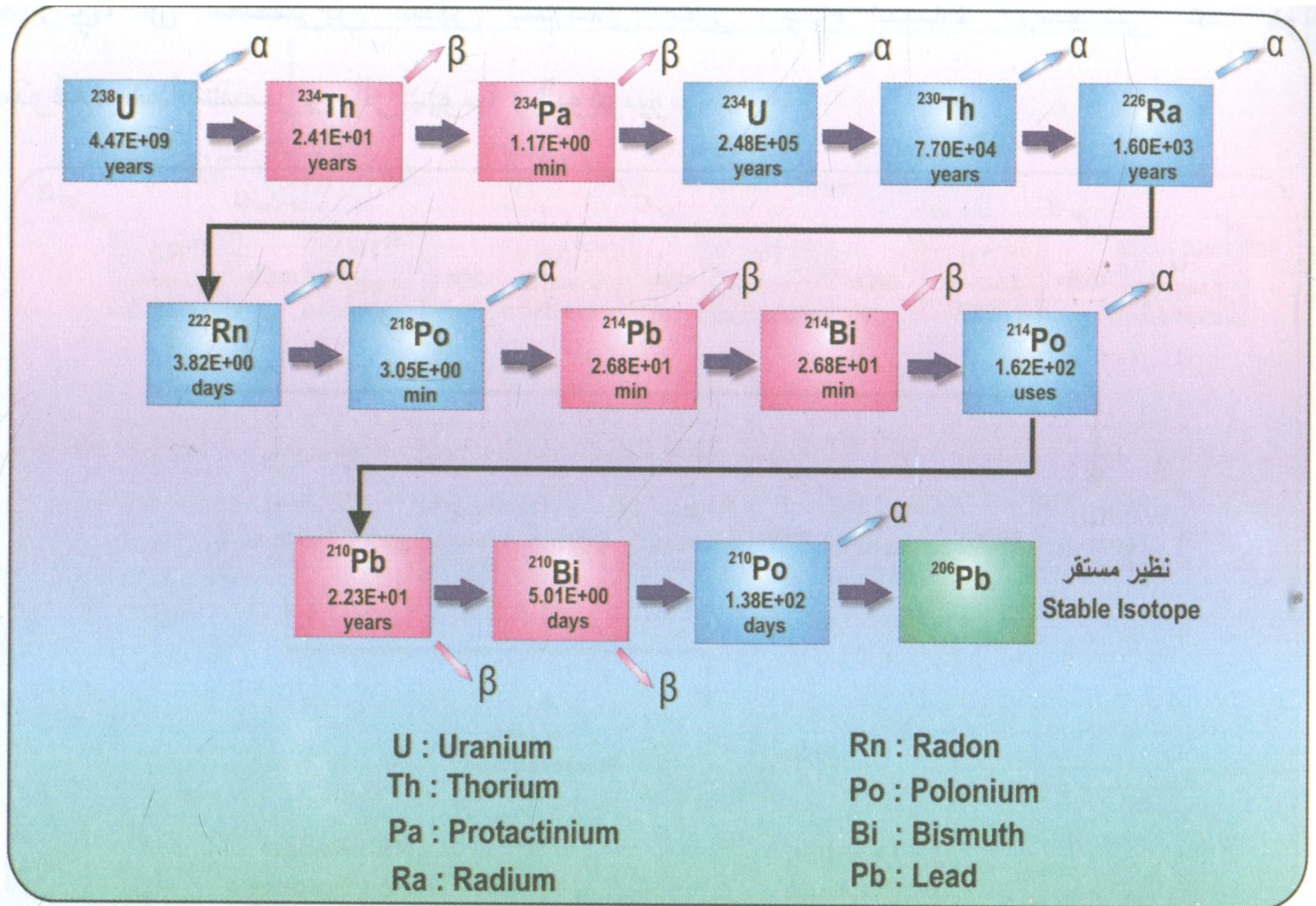
أنوية ذراته، وسميت هذه الحالات بالنظائر. وتحتل النظائر للعنصر الواحد نفس المكان في الجدول الدوري، فمثلاً للهيدروجين ثلاثة نظائر، تقع كلها في الخانة الأولى من الجدول الدوري، وهي: التريتيوم والدوتيريوم، والهيدروجين، وللأكسجين سبع نظائر،..الخ. تختلف نظائر العنصر الواحد في خواصها النووية، على الرغم من تطابق خواصها الكيميائية، وتتوقف هذه الخصائص النووية على عدد النيوترونات في نواته. وتصنف النظائر بشكل عام إلى نوعين:

١- نظائر مستقرة (stable isotopes)، وهي لا تتغير أبداً، وتشكل غالبية النظائر الموجودة في الطبيعية.

٢- نظائر غير مستقرة (unstable isotopes)، ويمكن أن تسمى أيضًا نظائر مشعة، وهي أقل تواجدًا في الطبيعة من النظائر المستقرة، ويرجع سبب عدم استقرارها لوجود طاقة زائدة داخل نوى ذراتها، مما يجعلها تسعى دائماً، وبشكل تلقائي، للتخلص من هذه الطاقة، وهذا ما نسميه بالتحلل (disintegration)، أو الاضمحلال (decay)، وينتج عن ذلك أن تنتقل نواة الذرة من حالة إلى أخرى، أو أنها تتحول إلى نظير آخر.

يوجد في الطبيعة ثلاث سلاسل اضمحلال طبيعية لعنصري اليورانيوم والثوريوم، يرجع اسم السلسلة إلى اسم النظير الأم (parent isotope)، هذه السلاسل هي: سلسلة اليورانيوم^{٢٣٨} (^{238}U)، وسلسلة اليورانيوم^{٢٣٥} (^{235}U)، وسلسلة الثوريوم^{٢٣٢} (^{232}Th). عندما يبدأ اليورانيوم^{٢٣٨} في الاضمحلال، فإنه في البداية يصدر جسيم ألفا، ليعطي نظيراً للثوريوم، هو ثوريوم^{٢٣٤}. بعد ذلك يفقد نظير الثوريوم^{٢٣٤} جسيم بيتا، ليصبح بروتواكتنيوم^{٢٣٤} (^{234}Pa)، وتستمر سلسلة الاضمحلال من خلال الثوريوم، والراديوم، والرادون، والبولونيوم، والبيزموث،

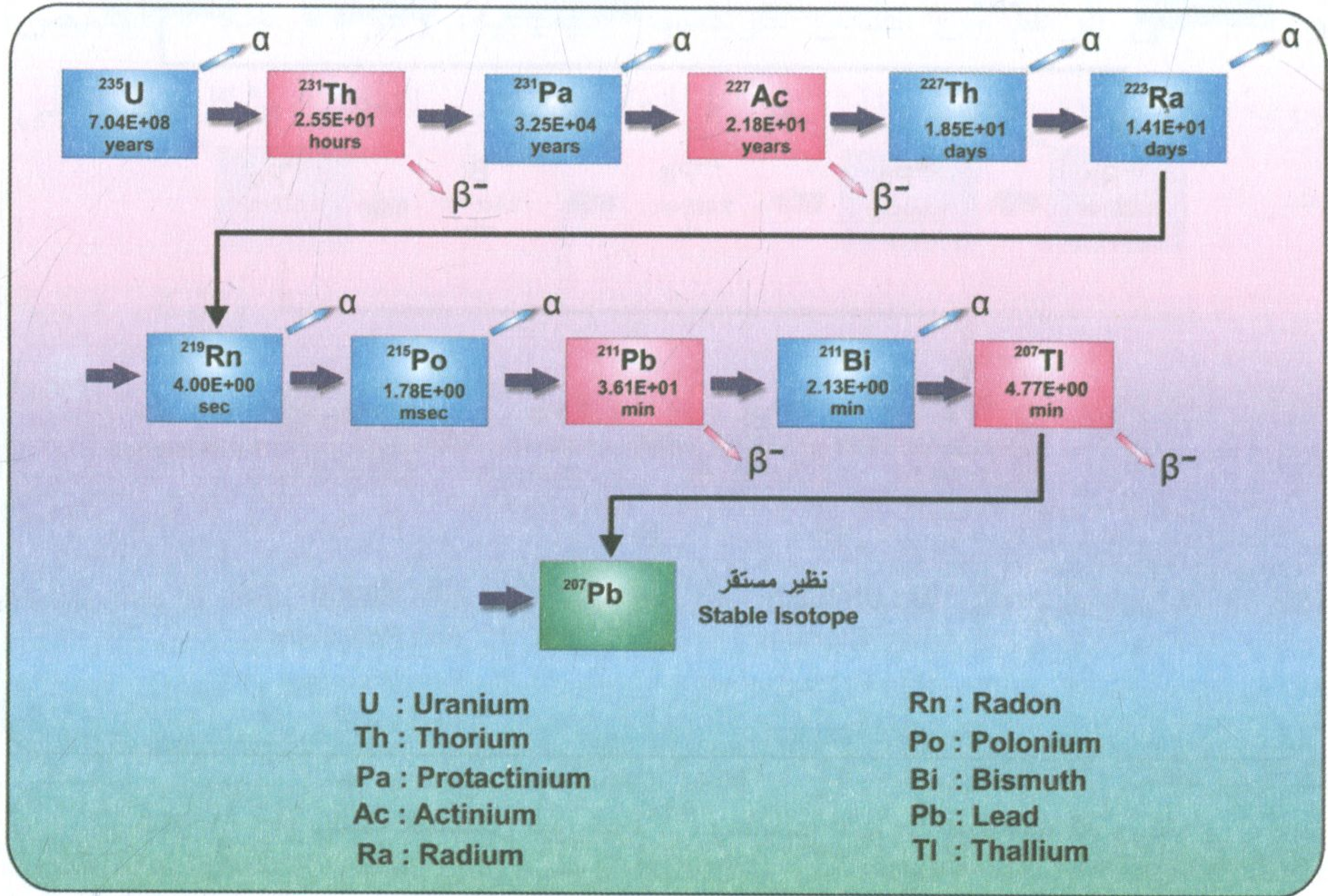
إلى أن تصل للرصاص[٢٠٦] المستقر (شكل ١-١٠)، وبنفس الطريقة تنتهي كل من سلسلتي اليورانيوم[٢٣٥]، والثوريوم[٢٣٢].



شكل ١-١٠: سلسلة اضمحلال اليورانيوم[٢٣٨]، وما ينتج عنها من إشعاعات ألفا وبيتا.

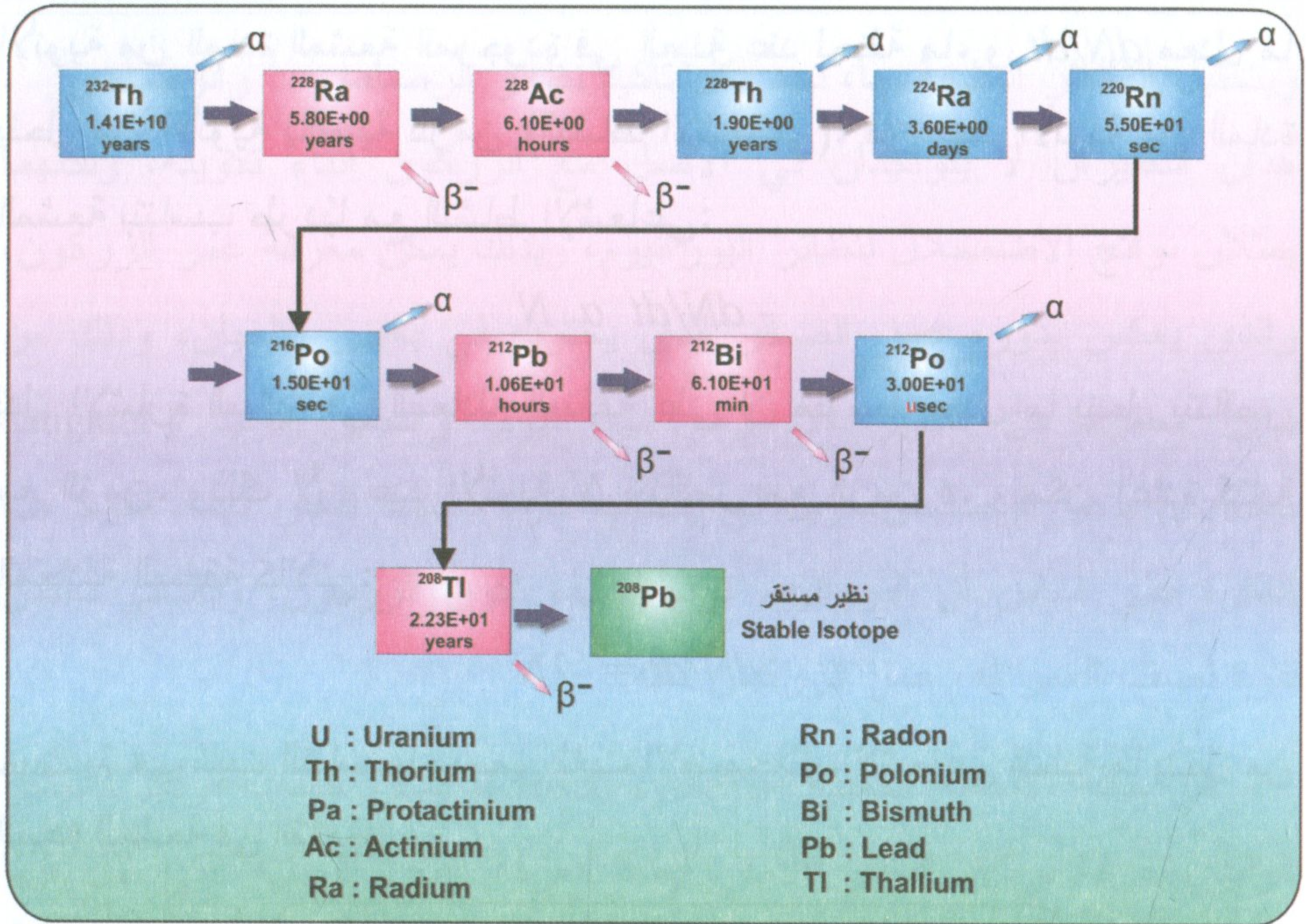
نخلص من ذلك أن الذرة المشعة لها قدرة على التغير المتتابع، أو الاضمحلال، لذرات مختلفة النوع. من المتوقع في أماكن تركيزات خام اليورانيوم أن نجد غالبية نواتج الاضمحلال لليورانيوم كما هو واضح بالأشكال (١-١٠ و ١-١١ و ١-١٢)، تعد كل هذه النواتج أكثر نشاطاً من اليورانيوم ذاته، وقد يتركز بعض من هذه النظائر المشعة بنسبة أكثر في الطبيعة، نتيجة للعمليات الجيوكيمائية المختلفة، مثل الراديوم، والذي يكثر تركيزه في بعض الرواسب المشعة، والذي يجعل من خام اليورانيوم في هذه الحالة أكثر إشعاعًا عن الطبيعي، وقد لفتت هذه الظاهرة انتباه ماري كوري، حيث وجدت أن الخام الغني بمعدن فوسفات اليورانيوم، الذي يسمى أوتونيت (autunite)، يكون أكثر

نشاطًا إشعاعيًا مما هو متوقع. لقد توصلت إلى أن عينة الخام تحتوي على نواتج اضمحلال ذات نشاط إشعاعي عالي. بعد العديد من التجارب والأبحاث، وجدت كوري، أن العنصرين اللذين يساعدان على زيادة النشاط الإشعاعي عما هو متوقع، هما عنصري الراديوم، والبولونيوم.



شكل ١-١١: سلسلة اضمحلال اليورانيوم^٢٣٥، وما ينتج عنها من إشعاعات ألفا وبيتا.

تتميز سلاسل الاضمحلال الإشعاعي بأن النظير الأم (مثل اليورانيوم^٢٣٨) في حالة نشطة إشعاعيًا، وأن له فترة نصف العمر أطول من التي تتوسط السلسلة. يمكن تعريف فترة نصف العمر (half life time) على أنها الفترة الزمنية، التي تتطلبها المادة المشعة كي تفقد نصف نشاطها الإشعاعي، أو الفترة الزمنية التي يتبقى بعدها نصف عدد الذرات المكونة لنظير ما. على سبيل المثال، ينبعث من ذرة اليورانيوم^٢٣٨ بلايين الجسيمات من ألفا وبيتا، وبالتالي فإنها تضمحل، أي تفقد جزءًا من نشاطها الإشعاعي. ومع نهاية فترة نصف



شكل ١-١٢: سلسلة اضمحلال الثوريوم٢٣٢، وما ينتج عنها من إشعاعات ألفا وبيتا.

العمر، ستفقد هذه الذرة نصف نشاطها الإشعاعي، ومع نهاية فترة نصف العمر الأخرى، فإنها ستفقد نصفًا آخر من نشاطها الإشعاعي. ولإيضاح معنى فترة نصف العمر، نفرض أن ذرة اليورانيوم٢٣٨ تمتلك في عينة ما عدد ١٠٠٠ ذرة، فسوف تمتلك ٥٠٠ ذرة فقط مع نهاية فترة نصف العمر الأولى. ومع نهاية فترة نصف العمر الثانية، فسوف يتبقى فقط ٢٥٠ ذرة (شكل ١-١٣). وتختلف فترة نصف العمر، باختلاف النظير، فهناك نظائر لا يتعدى فترة نصف أعمارها جزءًا من الميكروثانية، وأخرى تزيد فترة نصف أعمارها على ملايين السنين.

توجد علاقة وثيقة بين معدل الاضمحلال، وفترة نصف العمر. تتضح هذه العلاقة من قانون الاضمحلال الإشعاعي، والذي ينص على أن "عدد الأنوية المتبقية من انحلال أي مادة مشعة، هو دالة أسية سالبة مع الزمن". لتكن N عدد

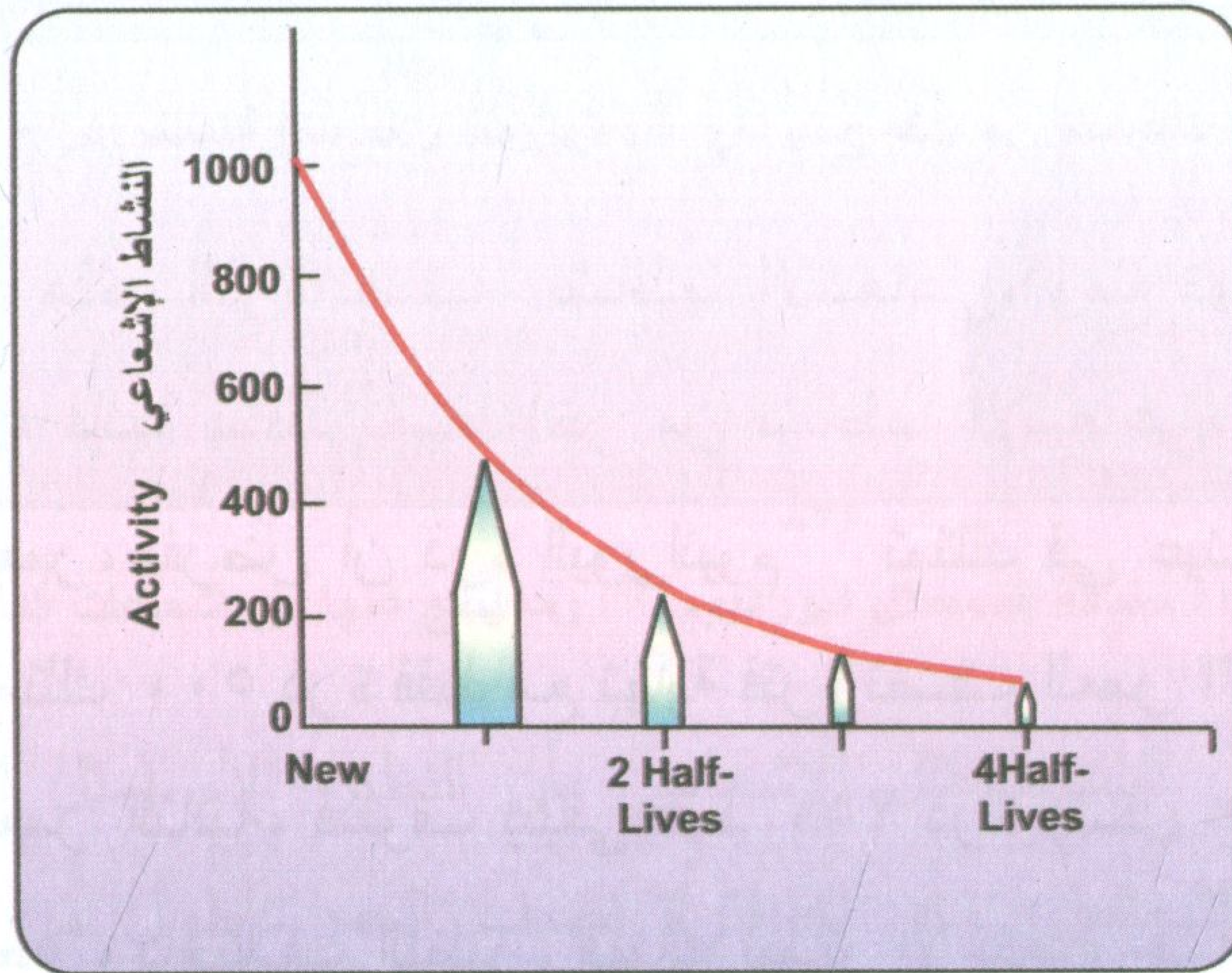
الأنوية من المادة المشعة الموجودة في العينة عند لحظة ما، و dN/dt معدل ما ينحل من الأنوية بالنسبة للزمن (النشاط الإشعاعي)، فإن عدد الأنوية من المادة المشعة يتناسب طرديًا مع النشاط الإشعاعي:

$$-dN/dt \ \alpha \ N$$

تدل الإشارة السالبة في المعادلة السابقة على أن متوسط معدل ما ينحل يتناقص مع الزمن، وذلك لأن عدد الأنوية N تتناقص مع الزمن t. ويمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة كالآتي:

$$dN/dt = -\lambda N$$

حيث λ هي ثابت التناسب، ويسمى ثابت الاضمحلال الإشعاعي (نسبة ما ينحل من المادة المشعة في الثانية).



شكل ١-١٣: رسم توضيحي يبين مفهوم فترة نصف العمر، والتي تعني الزمن اللازم لأن تقل كمية المادة المشعة إلى النصف.

ساعدت ظاهرة الاضمحلال الإشعاعي الجيولوجيين في تحديد عمر الصخور، وبالتالي معرفة كثير من المعلومات عن نشأة الأرض وتطورها، وعلى سبيل المثال، يمكن فصل بلورة لمعدن الزركون من أحد الصخور

وبتحليل النظائر المشعة بها، نجد بكل تأكيد نظائر الرصاص[٢٠٦] والرصاص[٢٠٧]. هذان النظيران لا يتواجدان في الأصل مع الزركون أثناء تكوينه، ولكنهما يمثلان نواتج الاضمحلال لنظائر اليورانيوم، وبذلك يمكن معرفة عمر الزركون، والذي يعكس بدوره عمر الصخر الذي يحتويه في بعض الاحيان، وذلك من تباين محتواه من النظير الأم وهو اليورانيوم، والنظير الوليد (daughter isotope) وهو الرصاص، وبالتالي حساب فترة نصف العمر لهما. تقوم هذه الفكرة على أساس أن اليورانيوم تواجد أثناء تكّون الزركون، وبالتالي تعكس فترة نصف العمر له، عمر الزركون ذاته.

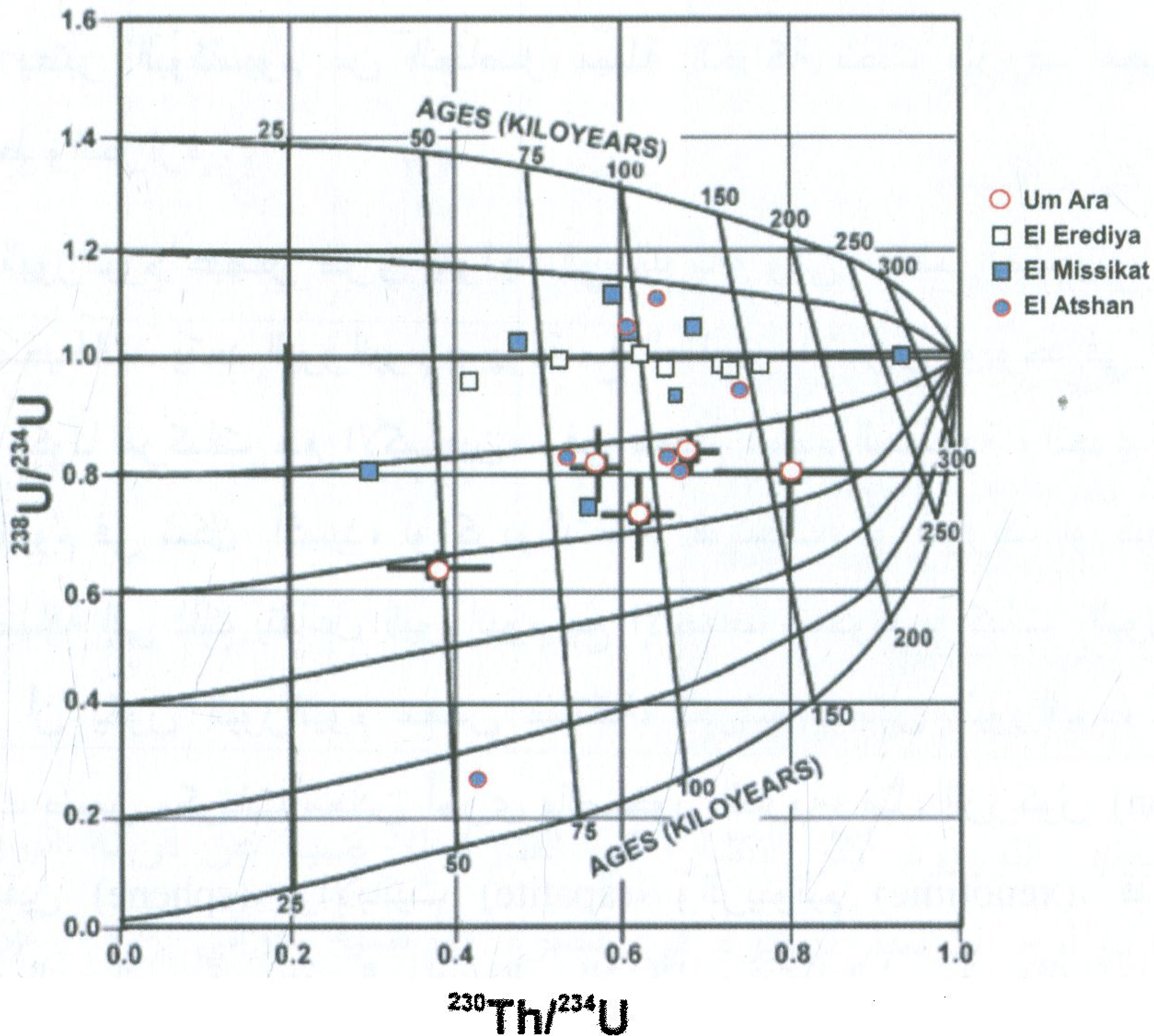
في حالة الأنظمة المغلقة (closed systems)، يمكن حساب تركيز النظير الوليد بمعرفة تركيز النظير الأم، وأيضًا معرفة الفترة الزمنية التي ظل فيها النظام مغلقاً دون هجرة هذه النظائر. لو أن الفترة التي ظل فيها النظام مغلقًا كبيرة، بالنسبة إلى فترة نصف العمر للنظير الأم، فإن نشاط كل من النظائر الوليدة، ستساوي نشاط النظير الأم المكافئ لها، ويطلق على هذه الحالة الاتزان الإشعاعي (radioactive equilibrium). ولكن يصعب في الطبيعة وجود مثل هذا الاتزان، لما يتم من متغيرات جيولوجية على سطح الأرض أو تحتها، مما يؤدي إلى هجرة بعض هذه النظائر، استجابة للتغيرات الفيزيائية والكيميائية. على سبيل المثال، يؤدي وجود كسور وشقوق في القشرة الأرضية إلى هروب أحد نظائر اليورانيوم، وهو الرادون، مما يؤدي إلى ما يسمى بعدم الاتزان الإشعاعي (radioactive disequilibrium).

ولظاهرة عدم الاتزان الإشعاعي عدة تطبيقات عملية ناجحة في الآونة الأخيرة، استخدمت لحل كثيرٍ من المشاكل الجيولوجية (Osmond, 2003، وداود ٢٠٠١م). على سبيل المثال، في تحديد العمر لرواسب اليورانيوم، وفي حقن

خزانات النفايات (aquifer waste injection)، وأيضًا في التنبؤ بالبراكين والزلازل.

تعتمد تطبيقات النظائر في تحديد أعمار رواسب اليورانيوم على قياس نشاط كل من اليورانيوم ووليداته، حيث إنه يفترض وجود حالة من الاتزان بينهما، بخامات اليورانيوم المتكونة منذ ملايين السنين، ولكن هذا لا يحدث في كثير من الأحيان، نظرًا لما يطرأ على هذه الخامات من تغيرات إثر عمليات جيوكيميائية عديدة، مما يؤدي إلى إحداث نوع من عدم الاتزان بين اليورانيوم ووليداته. في هذه الحالة، يمكن حساب العمر المزامن لتلك العمليات الجيوكيميائية، أو الأحداث الجيولوجية، عن طريق قياس الفترة التي يحتاجها النظام ليعود إلى حالة الاتزان مرة أخرى. يعتمد تحديد العمر باستخدام سلسلة اليورانيوم (U-series) على طريقتين رئيسيتين: تعتمد الطريقة الأولى على تراكم نواتج الاضمحلال لليورانيوم، وتسمى بطريقة تراكم الوليد (daughter excess methods)، وتعتمد الطريقة الثانية على اضمحلال وليدات وسط السلسلة، وتسمى بطرق تناقص الوليد (daughter deficiency methods). في حالة الطريقة الأولى، ربما تترسب النواة الأم بمفردها دون وليداتها، وبالتالي يمكن تحديد عمر راسب اليورانيوم عند زمن ما، بمعرفة مدى نمو الوليد بنظام الاتزان للنظير الأم. تعتبر طريقة تحديد العمر ثوريوم^{٢٣٠}/يورانيوم^{٢٣٤} أحد الأمثلة لهذه الطريقة. وفي حالة الطريقة الثانية، فإن النظير الوليد يتواجد بنسبة أعلى من النظير الأم، ويتم تحديد عمر الخام في هذه الحالة بقياس اضمحلال هذه النسبة الزائدة من النظير الوليد، منذ زمن تكّون الخام. من أمثلة تطبيقات هذه الطريقة، استخدام الثوريوم^{٢٣٠} والبروتواكتنيوم^{٢٣١} (^{231}Pa) في تحديد أعمار الرواسب البحرية العميقة (deep-sea sediments).

من أمثلة تطبيقات طريقة الثوريوم[٢٣٠]/اليورانيوم[٢٣٤] لتحديد عمر رواسب اليورانيوم الثانوية، هو ما قام به كل من أوزموند وآخرون (Osmond *et al.*, 1999)، وداود (Dawood, 2001). في هذا العمل، تم تحديد أعمار معادن اليورانيوم بمناطق عدة بالصحراء الشرقية المصرية، منها أم آرا، والمسكات، والعرضية، والعطشان. تستطيع هذه الطريقة قياس أعمار تصل إلى ٣٥٠ ألف سنة. يوضح الشكل (١-١٤) الأعمار المقاسة لخامات اليورانيوم بالمناطق المذكورة، والتي تقع في مدى يتراوح بين ٥٠ و ١٥٩ ألف سنة، فيما عدا نقطتين تتعدى هذه الحدود. تضاهي هذه الأعمار المقاسة الفترات المطيرة (pluvial periods) السائدة بالصحراء الشرقية المصرية، أثناء عصر



شكل ١-١٤: الأعمار المقاسة لخامات اليورانيوم الثانوية بمناطق عدة بالصحراء الشرقية المصرية، باستخدام تطبيقات الثوريوم[٢٣٠]/اليورانيوم[٢٣٤] (**Osmond *et al.*, 1999**، **Dawood 2001**).

البليستوسين المتأخر (late Pleistocene). ويرجع التباين في هذه الأعمار إلى تكّون خامات اليورانيوم الثانوية في أكثر من فترة من هذه الفترات.

٥- مستوى الإشعاع بالقشرة الأرضية

Natural Radiation in the Earth's Crust

من ضمن العديد من النظائر المشعة بالقشرة الأرضية، فإن هناك أربع نظائر أكثر انتشارًا وهي: اليورانيوم^{٢٣٨}، واليورانيوم^{٢٣٥}، والثوريوم^{٢٣٢}، والبوتاسيوم^{٤٠}. يعتبر عنصر البوتاسيوم تاسع عنصر من العناصر المكوّنة للقشرة الأرضية، حيث يمثل المحتوى الأساسي للعديد من المعادن المكونة لصخورها (جدول ١-٢). تبلغ فترة نصف العمر للبوتاسيوم ١,٤١٥ × ١٠^{٩} سنة. يعتبر البوتاسيوم من العناصر سهلة الحركة تحت ظروف معينة من الضغط والحرارة .

اليورانيوم عنصر فلزي يتواجد في التربة، وفي معظم الصخور، وأيضًا في المحيطات. يتحد اليورانيوم بسهولة مع العناصر الأخرى، ويوجد في الطبيعة عادة مكونًا مركبات مع الأكسجين، وفي معظم المياه السطحية والجوفية يوجد اليورانيوم في شكل أكسيد، أو كربونات، أو فوسفات، أو فلوريد، أو كبريتات، وبالإضافة إلى ذلك يتفاعل اليورانيوم مع الأحماض مكونًا مركبات اليورانيوم. يمكن أن يكّون اليورانيوم معادن مستقلة، تعرف بمعادن اليورانيوم، أو أنه يشترك ضمن مكونات معادن أخرى بالصخور النارية، مثل الزركون (zircon)، والاسفين (sphene)، والأباتيت (apatite)، والزينوتيم (xenotime). قد يؤدى وجود اليورانيوم في هذه المعادن إلى الإخلال ببنيتها البلورية وذلك لما يصدر عنه من إشعاع (شكل ١-١٥). يعتبر نظير اليورانيوم^{٢٣٨} أكثر نظائر اليورانيوم

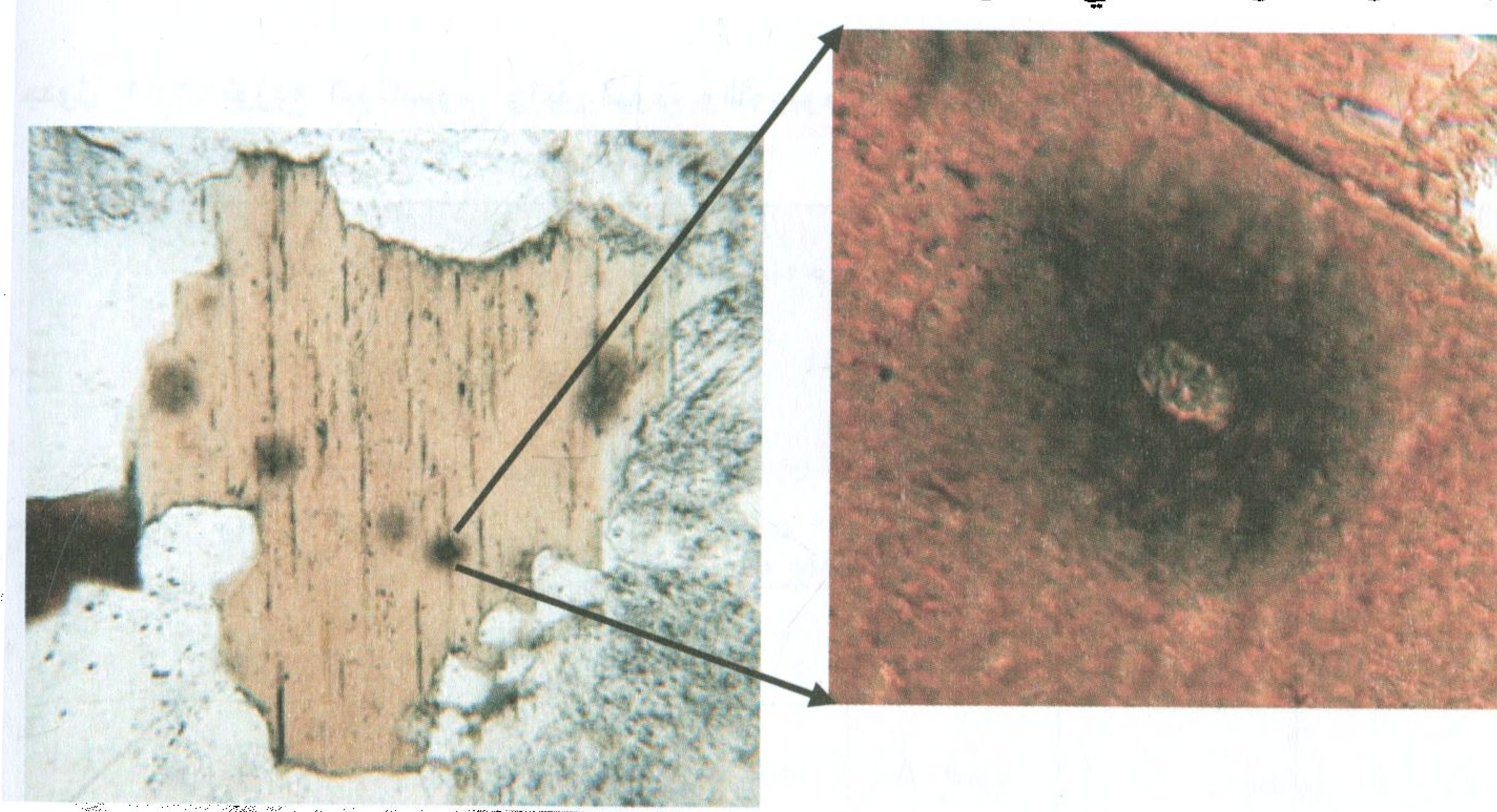
انتشارًا في الطبيعة، حيث يمثل ٩٩,٢٧٤٪ من مجموع تركيز نظائر اليورانيوم، بينما يمثل النظير اليورانيوم[٢٣٥] ٠,٧٢٠٪، ويمثل اليورانيوم[٢٣٤] ٠,٠٠٦٪.

جدول ١-٢: توزيع البوتاسيوم، واليورانيوم، والثوريوم بصخور القشرة الأرضية، جزء في المليون (عن بلانت وآخرون ١٩٩٩ Plant *et al.*).

	بوتاسيوم K	يورانيوم U	ثوريوم Th	ثوريوم/ يورانيوم Th/U
كوندريت Chondrite	٥٤٥	٠,٠٠٧٤	٠,٠٢٩	٣,٩٢
الوشاح الأولي Primitive mantle	٢٥٠	٠,٠٢١	٠,٠٨٥	٤,٠٥
القشرة القارية Continental Crust				
الجزء العلوي	٢٧٥٠٠	٢,٥	١٠,٥	٣,٢
الجزء الأوسط	١٧٥٠٠	٢,٢	٨,٤	٣,٨٢
الجزء الأسفل	٨٣٣٣	٠,٠٥	٠,٤٢	٨,٤
القشرة المحيطية Oceanic Crust				
بازلت حيد منتصف المحيط Mid-Ocean ridge basalt	٦٠٠	٠,٠٤٧	٠,١٢	٢,٥٥
بازلت الجزر المحيطية Ocean island basalt	١٢٠٠٠	١,٠٢	٤,٠	٣,٩٢

يعتبر الثوريوم أكثر انتشارا في القشرة الأرضية عن قرينه اليورانيوم، حيث يتراوح متوسط تركيزه في القشرة الأرضية حوالي ١٠,٥ جزء في المليون (ppm). يتواجد الثوريوم أيضًا بكثرة في المعادن الإضافية مثل المونازيت، والزركون، والاسفين، والإبيدوت، والأباتيت. تبلغ فترة نصف العمر

للثوريوم[٢٣٢] ١,٤ × ١٠[٩] سنة. على عكس قرينه اليورانيوم، نجد الثوريوم صعب الحركة، ومحدد في الحركة الميكانيكية فقط للمعادن الحاوية له.



شكل ١–١٥: هالة متغيرة الألوان حول الزركون المتواجد كمكتنفات بالبيوتيت بصخور الطف بمنطقة فيش كانيون **Fish Canyon** (**www.ucl.ac.uk/~ucfbrxs/PLM/zircon.html**).

تزداد إشعاعية الصخور النارية بزيادة محتواها من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، وبالتالي نجد أن الصخور النارية المتأخرة النشأة (الفلسية) تكون أكثر إثراء بمعادن اليورانيوم، أو المعادن الحاوية على اليورانيوم (جدول ١–٣).

جدول ١–٣: تركيز عنصر اليورانيوم بالصخور النارية، جزء في المليون، عن بلانت وآخرون (**Plant *et al.* 1999**).

نوع الصخر	متوسط تركيز اليورانيوم (ppm)	مدى تركيز اليورانيوم (ppm)
الصخور المافية	٠,٨	٠,١ – ٣,٥
الديوريت والكوارتز ديوريت	٢,٥	٠,٢ – ١٢
الصخور الفلسية	٤,٠	١–٢٢
الصخور المتداخلة القلوية		٠,٠٤ – ٢٠

يعتمد محتوى العناصر المشعة في الصخور الرسوبية على نوعية هذه الصخور (جدول ١-٤)، حيث نجد أن أكثر محتوى لليورانيوم يكون في صخور الطفلة السوداء، وصخور الفوسفات، ورواسب الفحم. يرجع ذلك إلى قدرة المعادن، في هذه الصخور، على استقطاب اليورانيوم الذائب في المياه، واحتوائه في بنياتها البلورية، أو تكوين معادن جديدة على أسطحها. مثال ذلك، الدور الذي يلعبه الأباتيت في استقطاب اليورانيوم وتكوين معدن الأوتونيت (Abd El-Naby and Dawood, 2008)، وأيضًا دور المعادن الطينية في استقطاب اليورانيوم وتكوين معدن اليورانوفان على سطحه (عبد النبي ٢٠٠٩ج). بينما نجد الصخور الرسوبية المتمثلة في الحجر الجيري، والجبس، والملح الصخري أقل محتوى في العناصر المشعة من الصخور السابق ذكرها.

جدول ١-٤: تركيز عنصر اليورانيوم بالصخور الرسوبية، جزء في المليون (Plant *et al.*, 1999).

نوع الصخر	متوسط تركيز اليورانيوم (ppm)	مدى تركيز اليورانيوم (ppm)
الطفلة	٣,٠	١- ١٥
الطفلة السوداء		٣ - ١٢٥٠
الحجر الرملي	١,٥	٠,٥ - ٤
الحجر الجيري	١,٦	٠,١ - ١٠
الفوسفوريت		٥٠ - ٢٥٠٠
لجنيت		١٠- ٢٥٠٠

تعتمد إشعاعية الصخور المتحولة على طبيعة صخر المصدر، ومحتواه من العناصر المشعة، ولكن في بعض الأحيان قد يحدث نوع من الإثراء الإشعاعي

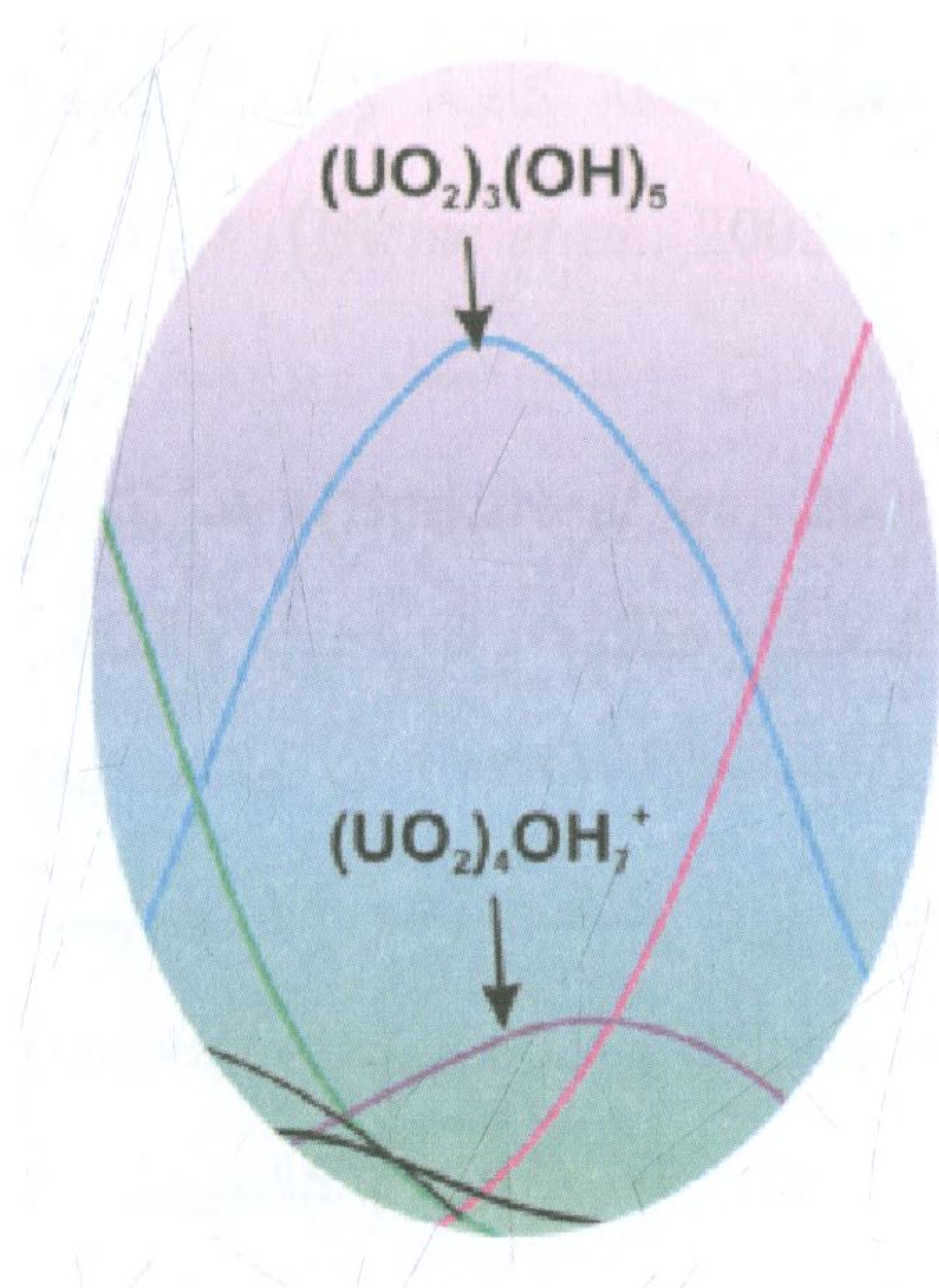
أثناء عمليات التحول، وخصوصًا التحول بفعل المحاليل الحرمائية. تحتوى صخور النايس (gneiss)، والجرانيت المتحول (meta-granite)، أحيانًا، على محتوى عالٍ من العناصر المشعة (مثال صخور النايس بمنطقة وادي نجرس (Wadi Nugrus)، الصحراء الشرقية، مصر)، بينما نجد أن المحتوى الإشعاعي لصخور الرخام، والسربينتينيت ضعيفة جدًا. يوضح الجدول (١-٥) محتوى العناصر المشعة لبعض الصخور المتحولة.

جدول ١-٥: محتوى البوتاسيوم، واليورانيوم، والثوريوم بالصخور المتحولة (Matolin, 1984).

الصخر	البوتاسيوم (٪)	اليورانيوم ppm	الثوريوم ppm	الثوريوم/ اليورانيوم
النايس	٠,٢	٦,١	٠,٨	٠,٥
الأمفيبوليت	٧,٠	٠,١	٠,٤	٠,٤
الرخام	٤,٠	١,١	٨,١	٦,١

الباب الثاني
اليورانيوم وخصائصه الجيوكيميائية

- مقدمة
- الخصائص العامة لليورانيوم
- سلوك اليورانيوم فى الصهير
- سلوك اليورانيوم أثناء التغاير بفعل المحاليل الحرمائية
- سلوك اليورانيوم بالمياه الجوفية



١ – مقدمة

يتواجد اليورانيوم بصورة طبيعية واسعة الانتشار في أشكال كيميائية مختلفة، وفي العديد من البيئات، على سبيل المثال في التّربة، الصّخور، البحار، المحيطات، والكائنات الدقيقة (Greenwood and Eanshaw, 1984). اليورانيوم فلز ثقيل، فضي أبيض، لدن، ذو توصيل كهربائي ضعيف، وإلى حد ما ذو مغنطيسية أحادية (paramagnetic). إنه عنصر قابل للأكسدة بسهولة في الهواء، حيث يغطي بطبقة من الأكسيد، ومن ثم فإن اليورانيوم يوجد في الطبيعة بشكل أساسي على صورة مؤكسدة.

تقارب نسبة وفرة اليورانيوم في القشرة الأرضية، وفرة عناصر الموليبدنم (Mo) والزرنيخ (As)، بينما هو أكثر وفرة من النحاس (Cu)، والقصدير (Sb)، والتنجستن (W)، والكادميوم (Cd). يمكن لمسحوق اليورانيوم أن يحترق ذاتيًا في درجة حرارة الغرفة مع وجود الهواء، والأوكسيجين، والماء، وعند درجة حرارة ٢٠٠ إلى ٤٠٠ درجة مئوية في وجود ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين. قد تولّد أكسدة اليورانيوم تحت ظروف معيّنة، طّاقة كافية لإحداث انفجار كيميائي (Gindler, 1973، Atsdr, 1999، و Bleise *et al.*, 2003). في درجة حرارة المعمل، يكون اليورانيوم لينًا، ومع التسخين يصبح هشًا، وبزيادة درجة الحرارة فإنه يسلك سلوك المادة اللدنة (Burkart *et al.*, 2005). قد يتواجد اليورانيوم في ثلاثة أنظمة بلورية، هي: المعيني القائم، والرباعي، والمكعب (Epa, 1991). يُظهر اليورانيوم درجة انصهار عالية (١١٣٢ درجة مئوية)، وهو واحد من أثقل العناصر الطبيعية، حيث تزيد كثافته (١٩,٠٥ جم/سم^{٣}) بنسبة ٦٥٪ عن تلك للرصاص (Bleise *et al.*, 2003، و Burkart *et al.*, 2005). يمكن استخلاص اليورانيوم من أكاسيده عبر الاختزال بالكالسيوم، أو

الماغنيسيوم. يتفاعل اليورانيوم تقريبًا مع كلّ العناصر اللافلزية، حيث تزداد درجة تفاعل مكوناتها بالحرارة (Epa, 1991، و Lide, 1994).

٢- الخصائص العامة لليورانيوم

اليورانيوم عنصر سهل التفاعل، يتّحد مع كثير من العناصر ليكوّن العديد من مجموعات معادن اليورانيوم، والتي سوف نستعرضها في الباب الثالث من هذا الكتاب. يمكن أن يتحد أيون اليورانيل (UO_2^{2+}) بسهولة مع الأيونات الأخرى مثل الكلورين، والفلورين، والكربونات، والكبريتات، والفوسفات. في المحاليل المائيّة المعرضة للتهوية، يكون اليورانيل أكثر استقرارًا عند درجة حامضية (pH) تساوي ٢,٥. عندما تقترب درجة الحامضية من ٧، يكوّن أيون اليورانيل معقدات مستقرّة مع الفوسفات والكربونات. تلعب المعلومات الخاصة بنوع أيون اليورانيوم المتوفر في المصدر المائي دورًا كبيرًا في اختيار عمليّة معالجة خام اليورانيوم وإدارتها بنجاح (Sorg, 1991).

يعتبر اليورانيوم المنضب (depleted) من المخلفات الرئيسية في عملية تخصيب اليورانيوم. يصل محتوى اليورانيوم^{٢٣٥} في اليورانيوم المنضب النموذجي حوالي ثلث قيمته الأصليّة (٠,٢- ٠,٣ ٪). لقد تم استخدام اليورانيوم المنضب في ثلاثة نزاعات أخيرة على شكل قذائف: في العراق والكويت (١٩٩١م)، في البوسنة والهرسك (١٩٩٥م) وفي كوسوفو (١٩٩٩م). يمكن أن تضاهي خواص اليورانيوم المنضب الكيميائية والإشعاعية تلك لليورانيوم الطبيعي، يتشابه كلاهما في الصفات الكيميائية وأيضًا درجة السمّيّة (Toxicity). لقد تم تسجيل وجود اليورانيوم المنضب في البول، والبراز، والشعر والأظافر (Bleise *et al.*, 2003). عندما تخترق قذيفة من اليورانيوم المنضب جسم صلب،

ينتج عن ذلك شظايا وغبار ذات أحجام مختلفة من أكاسيد اليورانيوم. قد يؤدي استنشاق الجزيئات الدقيقة من غبار أكاسيد اليورانيوم عبر الجهاز التنفسي إلى الوفاة. كما يمكن لهذا الغبار أن ينتشر بواسطة الهواء، مما يؤدي إلى قتل أعداد كبيرة، أو إحداث إصابات خطيرة. ولقد أثبتت التجارب العلمية أن جزيئات اليورانيوم الدقيقة ليس لها تأثير يذكر على بعد ٥١٠ مترًا من موقع إصطدام القذيفة. يمكن أن يتعرض الأفراد لليورانيوم عن طريق الاستنشاق، أو الابتلاع، أو التماس الجلدي، ويعتبر الاستنشاق أكثر حالات التعرض، أثناء أو بعد الحروب، وقد يحدث الابتلاع عند فئات كثيرة من السكان نتيجة تلوث مياه الشرب، أو الأغذية باليورانيوم المنضب، ويعتبر التعرض لليورانيوم عن طريق الجلد من أقل الحالات أهمية، لأن كمية اليورانيوم المنضب التي تخترق الجلد لتصل إلى الدم تظل قليلة. ولكن يمكن أن يصل إلى الدورة الدموية من خلال الجروح المفتوحة، أو من شظايا اليورانيوم المنضب.

يمكن أن يوجد اليورانيوم في خمسة حالات أكسدة : +٢، و+٣، و+٤، و+٥ و+٦. ورغم ذلك، فإن الحالة الرباعية والسداسية هي أكثر الحالات استقرارًا مما يزيد من أهميتهما العملية. اليورانيوم رباعي التكافؤ مستقر بشكل معقول، ويكوّن هيدروكسيدات، وفلوريدات مهدرجة، وفوسفات ذات قابلية ذوبان منخفضة. اليورانيوم سداسي التكافؤ، هو الحالة الأكثر شيوعًا، ويوجد عادةً على شكل ثامن أكسيد اليورانيوم الثلاثي (U_3O_8). تتضمّن مركبات اليورانيوم الرئيسة: الأكاسيد، والفلوريد، والكربيد، والنّترات، والكلوريد، وأخرى (Epa, 1991، و Lide, 1994). أظهر العديد من معقدات اليورانيوم فائدة في التطبيقات

الصناعية، مثل: التّحفيز (catalysis)، استشعار الأيون والجزيء المتعادل، وتنشيط الجزيئات الصغيرة (Sessler *et al.*, 2006).

اليورانيوم عنصر سهل الحركة نسبيًا في المنطقة القريبة من سطح الأرض، يرجع ذلك إلى استقرارية أيون اليورانيوم السداسي (U^{6+}) في المركبات المائية. ولكن يمكن أن يترسب بالاختزال إلى اليورانيوم الرباعي (U^{4+})، أو على شكل معادن اليورانيوم، مثل الفوسفات، والسيليكات، والزرنيخات، والفانيدات، والأوكسي هيدروكسيدات، قد يتواجد العديد منها في آن واحد وفي نفس المكان. تعتمد كمية اليورانيوم المحررة من المصادر الثانوية إلى المياه الجوفية، أو السطحية على قابلية الذوبان، ومعدل التحلل للأصناف، كدالة لدرجة الحامضية (Burns and Finch, 1999). لذلك، فإن المعلومات عن قابلية ذوبان مركبات اليورانيوم هامة جدًا، بسبب هجرتها المحتملة في البيئات الجيولوجية المختلفة (جدول ٢-١).

تظهر معادن اليورانيوم تنوعًا ملحوظًا في تركيبها الكيميائي، حيث أنها تعتبر ذات مؤشّرات جيدة للبيئات الجيوكيميائيّة المتعلقة بالدورات الجيوكيميائيّة للعناصر. يؤدي كل من أكسدة وذوبان معادن اليورانيوم إلى زيادة تركيز اليورانيوم في المحاليل الحرمائية (hydrothermal)، بالإضافة إلى محاليل مياه الأمطار. تحت ظروف الاختزال، يمكن أن يُقاس انتقال اليورانيوم في أجزاء من السّنتيمتر. عند توفر الظروف بشكل يكفي لتثبيت أيون اليورانيل (UO_2^{+2}) ومعقداته، فيمكن لليورانيوم أن يهاجر عدة كيلومترات من مصدره الأصلي بالصخور المجواه حتى يترسب في صورة معادن اليورانيوم (Finch and Murakami, 1999).

جدول ٢-١: ذوبانية بعض مركبات اليورانيوم في بعض أنواع المذيبات (Atsdr, 1999).

مركب اليورانيوم Uranium compound	درجة الإذابة Solubility	
	في المياه	مذيبات أخرى
يورانيوم Uranium U	لا يذوب	يذوب في الأحماض
ثاني أكسيد اليورانيوم Uranium dioxide (UO_2)	لا يذوب	يذوب في حامض النيتريك HNO_3
ثالث أكسيد اليورانيوم Uranium triaoxide (UO_3)	لا يذوب	يذوب في حامض النيتريك HNO_3 وحامض الهيروكلوريك HCl
ثامن أكسيد اليورانيوم الثلاثي Triuranium octaoxide (U_3O_8)	لا يذوب	يذوب في حامض النيتريك HNO_3 وحامض الكبريتيك H_2SO_4
رابع فلوريد اليورانيوم Uranium tetrafluoride (UF_4)	يذوب بدرجة طفيفة جدًا	يذوب في الأحماض والقلويات المركزة
سادس فلوريد اليورانيوم Uranium hexafluoride (UF_6)	ينحل Decomposes	يذوب في الكلوروفورم
رابع كلوريد اليورانيوم Uranium tetrachloride (UCl_4)	يذوب	يذوب في الإيثانول Ethanol
فلوريد اليورانيل Uranyle fluoride (UO_2F_2)	يذوب	يذوب في الإيثانول Ethanol
أسيتات اليورانيل Uranyle acetate dehydrate $UO_2(CH_3COO_2)_2.2H_2O$	٧,٧ جم/١٠٠سم٣ عند ١٥ درجة مئوية	يذوب في الإيثانول Ethanol
نيترات اليورانيل Uranyle nitrate hexahydrate $UO_2(NO_3)2.6H_2O$	يمتزج Miscible في المياه عند ١٥ درجة مئوية	يذوب في الإيثانول Ethanol
ثاني يورانات الأمونيوم Ammonium diuranate $(NH_4)_2U_2O_7$	لا يذوب	يذوب في الأحماض
رابع أكسيد اليورانيوم Uranium peroxide (UO_4)	ينحل Decomposes	المعلومات غير متوفرة

أصناف اليورانيوم السداسي أقل تعرضًا للتحلل المائي من تلك لليورانيوم الرباعي، وبالتّالي فإن المواد الغروية (colloids) تلعب دورًا أقل في نقل اليورانيوم بالقرب من سطح الأرض. يستثنى من هذه القاعدة العامة، البيئات الغنية بالمواد العضوية، مثل مستنقعات الخث (peat bogs)، حيث تمتلك المواد العضوية ذات الوزن الجزيئي العالي (مثل الأحماض الدبالية humic acids) قابلية قوية لاستقطاب اليورانيوم السداسي تحت ظروف حامضية إلى قلوية (Kim, 1993، و Read *et al.,* 1993). قد يؤخّر هذا اليورانيوم السداسي في هجرته، وذلك بادمصاص معقدات اليورانيوم السداسي، والأحماض الدبالية على المواد الصّخريّة للخزان المائي.

تتميز معقدات كبريتات، وكربونات اليورانيوم بقابليتها للذّوبان، ومن ثم فإنها تنتقل بواسطة المياه الجوفية. دلت إحدى الدراسات لعينات مياه من أحد مناجم اليورانيوم بألمانيا، على أن صنف اليورانيوم المتكون، يعتمد بقوّة على قيم درجة الحامضية لهذه المياه. لقد وُجِد أن معقد كربونات يورانيل الكالسيوم [$Ca_2UO_2(CO_3)_3$] يكون ذا أهمية عند درجة حامضية تساوي ٧,١ في وسط مائي تعديني يحتوي على الكربونات والكالسيوم، بينما معقد كربونات اليورانيل [$UO_2(CO_3)_3^{4-}$] يكون ذا أهمية عند درجة حامضية تساوي ٩,٨ في وسط مائي متبقي من عمليات التعدين، ويحتوي على الكربونات وفقير في الكالسيوم، ويكون معقد كبريتات اليورنيل (UO_2SO_4) ذا أهمية، عند درجة حامضية تساوي ٢,٦ في وسط مائي تعديني يحتوي على الكبريتات (Abdelouas *et al.,* 1999).

تلعب تفاعلات الأكسدة دورًا هامًا في تحديد حركية الأكتينيدات (actinides) تحت سطح الأرض، حيث ترتبط السيطرة على تفاعلات الأكسدة في كثير من

الأحيان بمعادن الحديد، والخصائص الكيميائية المائيّة المرتبطة به. تعتبر الآليّات التي يتم بها السيطرة على تفاعلات الأكسدة المفتاح الأساسي لمعالجة ومنع حركية الأكتينيدات عند وجودها كملوّثات تحت سطح الأرض (Sorg, 1991).

تختلف مستويات اليورانيوم في الصخور النارية والرسوبية من ٠,٥ إلى ٤,٧ جزء في المليون. بينما تحتوي صخور الكربونات على متوسط تركيز يساوي ٢,٠ جزء في المليون من اليورانيوم. وتحتوي رمال الشاطئ المفككة على متوسط تركيز يساوي ٣,٠ جزء في المليون من اليورانيوم. يتعلق محتوى اليورانيوم في التربة على صخر المصدر الذي شكلت منه التربة. يصل متوسط تركيز اليورانيوم في التربة حوالي ١,٨ جزء في المليون. مع اعتبار أن مدى درجة الحامضية النموذجيّة للأنظمة المائية يتراوح بين ٤ و٩، وضغط جوي نسبي لثاني أكسيد الكربون ٠,٠٣ ٪، فإنه تتكون أصناف للكربونات عالية الحركة. من ثم، يسهل تحرك اليورانيوم من التربة إلى الأنهار والبحيرات. تحتوي المياه السطحية القارية على ٠,١ إلى ٥٠٠ $\mu g\ dm^{-3}$ من اليورانيوم. كما تتراوح تركيزات اليورانيوم في الأنهار من ٠,٢ إلى ٠,٦ $\mu g\ dm^{-3}$ (Kim, 1986، Bleise *et al.*, 2003، و Meinrath *et al.*, 2003).

تعتمد حركية اليورانيوم في التربة وانتقالها الرأسي إلى المياه الجوفية على خواص التربة (مثل درجة الحامضية (pH)، جهد الأكسدة والاختزال (redox potential)، ومسامية التربة، وحجم جزيئات التربة، وكمية الماء المتاح) (Bibler and Marson, 1999). ينتج استبقاء، أو احتجاز (Retention)، اليورانيوم في التربة عن عدّة عمليّات، مثل الادمصاص، أو الامتصاص، أو التّبادل الأيوني، أو صحبة من هذه العمليات (Allard *et al.*, 1982). بوجهٍ عام، يزداد

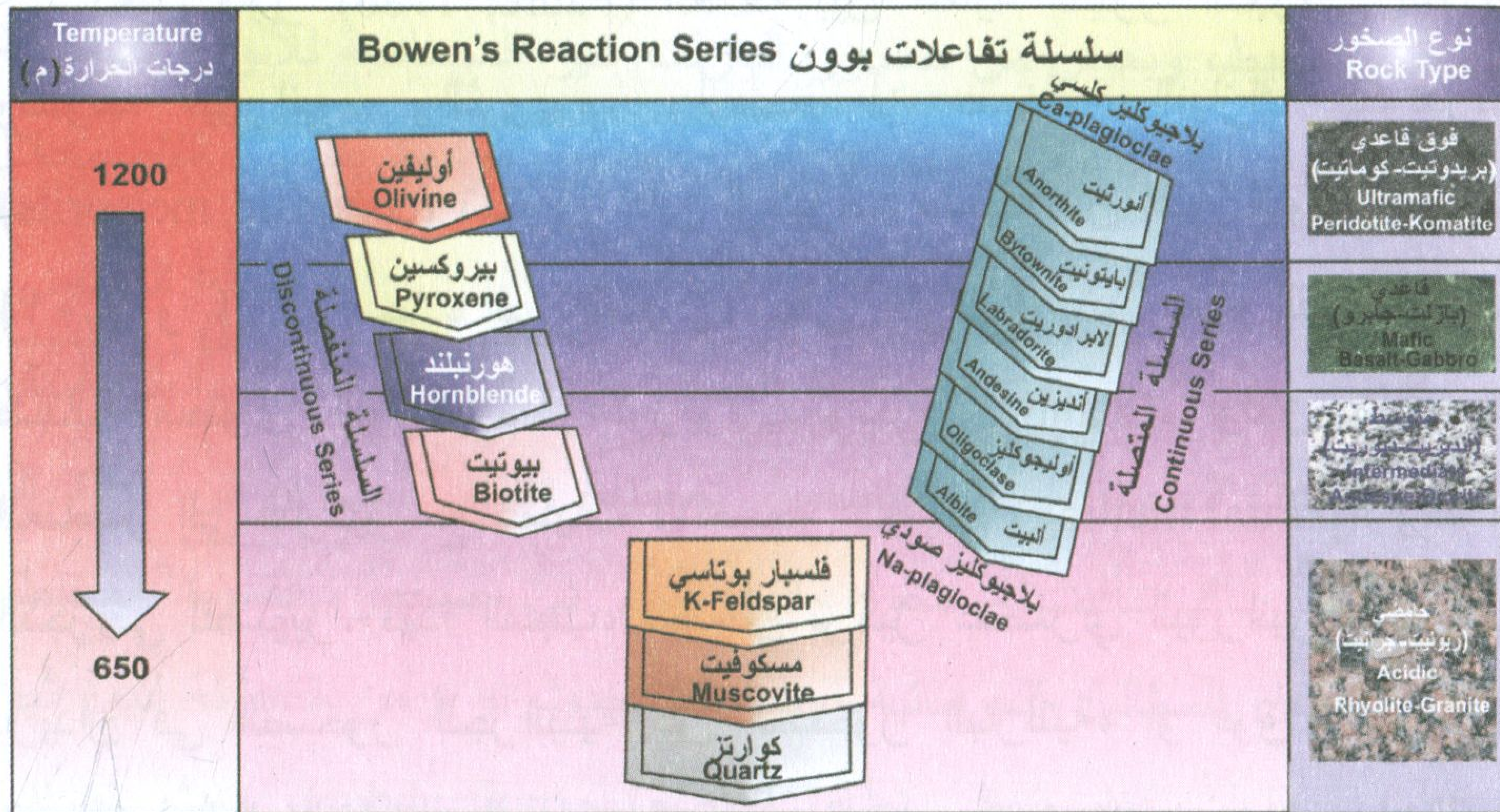
معدّل امتصاص اليورانيوم في التربة الغنية بالمعادن الطينية والحديدية. لذلك، لا يصل اليورانيوم عادةً إلى مستوى المياه الجوفية نتيجة استبقائه بواسطة هذه المعادن (Sheppard *et al.*, 1987). تتأثر نسبة اليورانيوم في الهواء بالتركيز وحجم جزيئاته، حيث تتراوح أبعاده من ١ إلى ١٠ ميكروميتر µm (Bigu and Duport, 1992).

٣- سلوك اليورانيوم في الصهير

هناك فكرتان أساسيتان عن سلوك اليوانيوم في الصهير، تعتمد الفكرة الأولى، على أن اليورانيوم يسلك نفس سلوك العناصر الأخرى أثناء عملية التبلور التجزيئي، وتفترض الفكرة الثانية، أن عنصر اليورانيوم لا يتم توزيعه بين المعادن المتبلورة في الصهير أثناء عملية التبلور التجزيئي للمعادن، كما يحدث للعناصر الكيميائية الأخرى، وقد أرجع ذلك إلى التركيز المنخفض لعنصر اليورانيوم في الصهير. تعتبر الفكرة الأولى أكثر واقعية، حيث أنه يحدث نوع من التوزيع لليورانيوم أثناء العمليات الصهيرية، مما يؤدى إلى زيادة تركيزه في الجزء الأكثر حامضية من الصهير، حيث يتكون الجرانيت والرايوليت، ويحتويان على أكبر نسبة من تركيز اليورانيوم عن سائر الصخور النارية الأخرى. على سبيل المثال، يحتوي الجرانيت والبيجماتيت على متوسط ٣-٥ جزء في المليون يورانيوم، بينما يحتوي البازلت على أقل من واحد جزء في المليون من اليورانيوم .

يرجع سبب إثراء اليورانيوم بالمرحلة المتأخرة من التبلور، إلى ما يسمى بالتمايز الصهيري (magmatic differentiation). أثناء تبريد الصهارة، فإنه يبدأ تكوّن بلورات، والتي تأخذ بعض العناصر من الصهير عند نموها، يعتمد ذلك على الصفة الكيميائية لكل عنصر، ومدى قابليته في الدخول إلى البلورة

المتكونة، أو البقاء في السائل. وحيث إن معامل التوزيع (kd) لليورانيوم صغير جدًا (kd < 1) في الصهير القاعدي، فإن تركيزه في الصهير يزداد مع نهاية عملية التبلور. حسب سلسلة تفاعلات بوون (Bowen's Reaction Series)، فإن المعادن ذات درجة الانصهار العالية هي التي تبدأ في التبلور أولاً، مثل الأولفين، والبيروكسين، ثم يتبع ذلك تبلور معادن الأمفيبول، ثم الميكا، والكوارتز (شكل ٢-١).



شكل ٢-١: سلسلة تفاعلات بوون Bowen's Reaction Series.

أثناء هذه السلسلة من التفاعلات، فإن الصهير يصبح فقيرًا في العديد من العناصر (kd > 1)، فيما عدا اليورانيوم وبعض العناصر الأخرى، ويرجع ذلك إلى أن حجم ذرة اليورانيوم لا تناسب، من حيث الحجم والشحنة، الدخول في البنية البلورية للمعادن المتبلورة حسب سلسلة بوون، ولذلك فإنه يميل إلى البقاء في الصهير. يصاحب اليورانيوم في البقاء بالصهير، عناصر أخرى مثل الثوريوم، والزركونيوم (Zr)، والنيوبيوم (Nb)، والبيريليوم (Be). يؤدى زيادة تركيز اليورانيوم والثوريوم في الصهير إلى زيادة فرصة اتحادهما مع ذرات

عناصر أخرى ليكونا معادن منفصلة. تتمثل هذه المعادن بشكل أساسي في اليورانينيت، والثوريت، أو أي معدن أخر حاوي على اليورانيوم والثوريوم. مع نهاية سلسلة تفاعلات بوون وتكوّن صخور الجرانيت الغنية بالفلسبار البوتاسي والكوارتز، فإن الصهير المتبقى يكون أقل لزوجة (أكثر سيولة) لوجود كميات كبيرة من الماء والغازات، مما يساعد على نمو بلوري أكبر وتكّون صخور البيجماتيت الغنية نسبيًا باليورانيوم.

ناقش فاور (Faure, 1986) العلاقة بين عملية التبلور التجزيئي للصهير وسلوك اليورانيوم والثوريوم، وأوضح أن صخور النيازك الكوندريتية (condritic meteorite) تحتوي على تركيزات ضئيلة من اليورانيوم والثوريوم (٠,٠١ و ٠,٠٠٤ جزء في المليون، على التوالي). تدل هذه القياسات على ضئالة محتوى اليورانيوم والثوريوم بالوشاح (mantle)، ولكن تميل هذه العناصر إلى التركيز مع عمليات الانصهار الجزئي (partial melting)، والتبلور التجزيئي للصهير. لهذا السبب، نجد أن تركيز عنصري اليورانيوم والثوريوم يزيدان في الصخور الجرانيتية عن الصخور البازلتية، أو فوق المافية. مع تكرار عملية التفارق الجيوكيمائي (geochemical differentiation) للجزء العلوي من الوشاح، يحدث نوع من التركيز لعنصري اليورانيـــوم والثوريوم بصخـــور القشرة القاريـــة، مقارنة بصخـــور الجزء العلوي من الوشـــاح (جدول ١-٢).

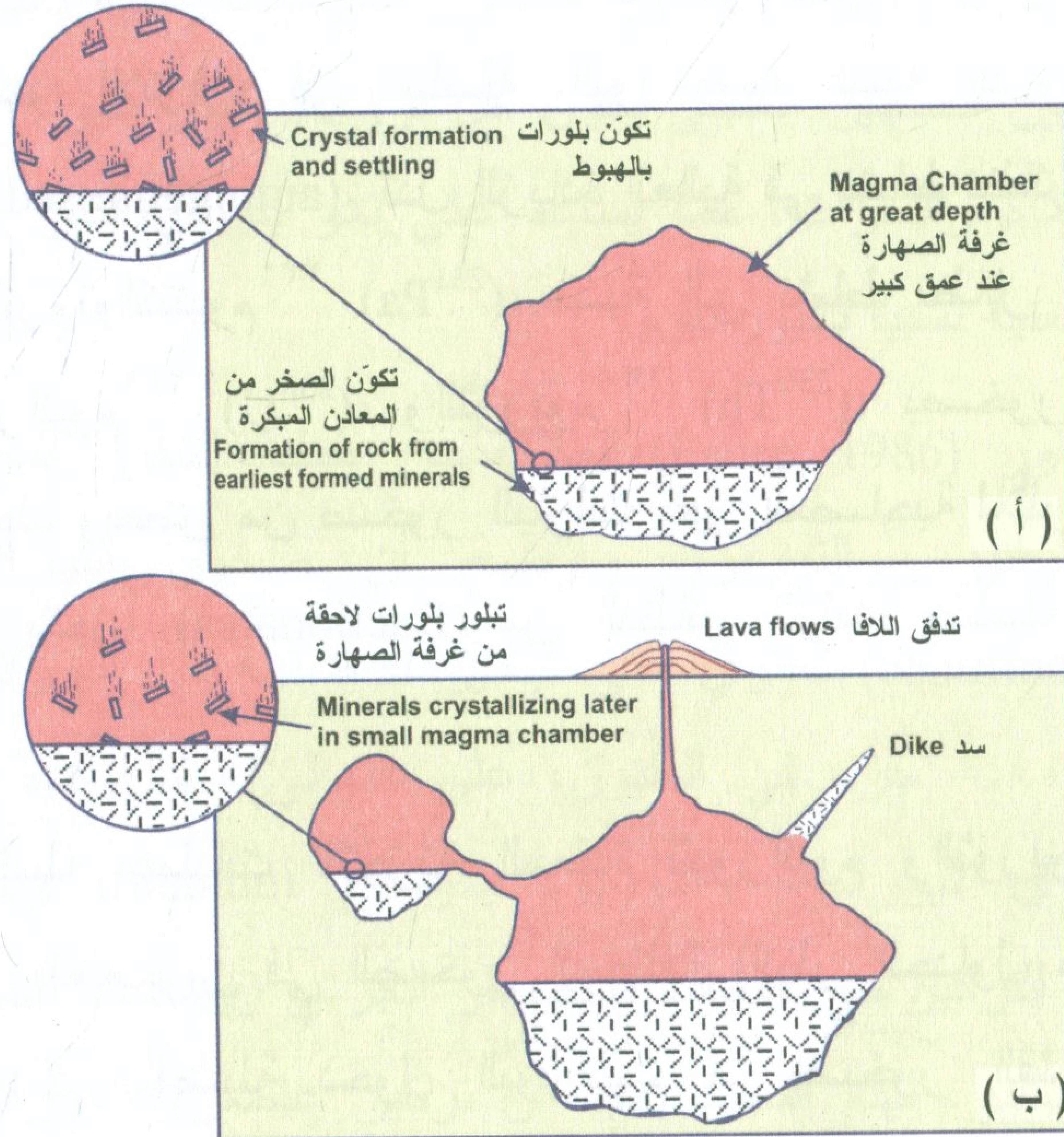
أظهرت بيانات نظائر اليورانيوم والثوريوم لصخور البازلت عند حيد منتصف المحيط أن هناك نوع من عدم الاتزان الإشعاعي (radioactive disequilibrium) أثناء عملية الانصهار، وصعود الصهير، مما يسمح بتحديد زمن نشأة هذا الصهير وزمن صعوده. كما تعطي هذه البيانات فكرة عن دور

الاتزان بين المعدن والصهير (mineral/melt) في عمليات التجزئة لليورانيوم والثوريوم. كما أوضح أوزموند (Osmond, 2003)، أن صخور البازلت عند حيد منتصف المحيط (MORB)، وكذلك العديد من الصخور المافية الأخرى، تُظهر نوعًا من عدم الاتزان في سلسلة اليورانيوم، نسبة للرواسب محلية النشأة (authigenic sediments). تدل الزيادة العالية في نشاط نظائر الراديوم^{٢٢٦} (^{226}Ra)، والبروتواكتنيوم^{٢٣١} (^{231}Pa)، نسبة إلى نشاط نظائر اليورانيوم^{٢٣٥} (^{235}U)، واليورانيوم^{٢٣٨} (^{238}U)، والثوريوم^{٢٣٠} (^{230}Th)، بصخور بازلت حيد منتصف المحيط، وبعض من صخور البازلت غير المصاحبة للألواح التباعدية، أن اليورانيوم يتجزأ (fractionates) من النظائر الوليدة بسلسلة الاضمحلال الإشعاعي.

تؤدي سلسلة عمليات التجزئة المعقدة لليورانيوم والثوريوم إلى تباين مستوى تركيز العنصرين في الصخور المختلفة (انظر الجداول من ١-٢ إلى ١-٤). يبدأ ذلك بأفضلية دخول اليورانيوم في صخور القشرة المحيطية المتغايرة بفعل المحاليل الحرمائية. بعد ذلك يحدث نوع من التجزئة لليورانيوم وما يصاحبه من عناصر في نطاق الانضواء (subduction)، حيث يتم نزع كميات من عناصر اليورانيوم، والبوتاسيوم، والثوريوم بالقشرة المنضوية، وتبقى في الصنف المائع (hydrous phase) من المحاليل المائية والمتطايرات، ثم تنتقل إلى صخور القشرة. قد يبقى بعض من هذا اليورانيوم في بعض الأصناف المعدنية الإضافية بالقشرة المنضوية، مثل معدن الروتيل بصخور الإكلوجيت، وتنتقل إلى الجزء السفلي من الوشاح (Plant *et al.*, 1999).

هناك الكثير من الأدلة على أن اليورانيوم يميل إلى الدخول في بعض المعادن أثناء عملية التبلور التجزيئي للصهير. تتميز هذه المعادن بدرجات

انصهار مختلفة وكثافة مختلفة. يوضح شكل (٢-٢) كيفية حدوث عملية التبلور التجزيئي، حيث تهبط المعادن المتبلورة أسفل غرفة الصهارة.



شكل ٢-٢: انفصال المعادن عن طريق التبلور التجزيئي (Tarbuck and Lutgens, 1984).
(أ) تكوّن الصخر من المعادن المتبلورة مبكرًا. (ب) تبلور لاحق لبعض المعادن من غرفة صهير صغيرة.

٤- سلوك اليورانيوم أثناء التغاير بفعل المحاليل الحرمائية
Behavior of Uranium during Hydrothermal Alteration

تعني كلمة التغاير بمعناها البسيط، تغير في التركيب المعدني والكيميائي للصخر إثر تأثره ببعض التغيرات في الظروف التي حوله. يصاحب ذلك استبدالاً للمعادن الأولية، والمتكونة مع نشأة الصخر، بمعادن ثانوية لاحقة. تتمثل هذه التغيرات في درجة الحرارة، أو الضغط، أو الظروف الكيميائية، أو

صحبة من هذه المتغيرات. يحدث التغير في التركيب المعدني للصخر من جراء عمليات تفاعل بين الصخر والمحاليل الحرمائية.

تشيع ظاهرة التغاير الحرمائي في العديد من البيئات الجيولوجية، مثل نطق التصدع المصاحبة للانفجارات البركانية. تتم عملية التغاير الحرمائي بدخول المحاليل الحرمائية إلى الصخر، وإحداث تغير في تركيبه بإضافة عناصر إليه، أو نزع عناصر منه، أو إنها تعمل على إعادة انتشار للعناصر المكونة لهذا الصخر. يختلف التركيب الكيميائي لهذه المحاليل بدرجة كبيرة، وقد تحتوي على كميات وأنواع مختلفة من الغازات، والأملاح، والماء، والفلزات في صورة معقدات مختلفة مثل الكربونات، والكبريتات، والفوسفات.

تلعب المحاليل الحرمائية دورًا كبيرًا في تكوين بعض الرواسب المعدنية، مما دفع كثير من العلماء والمهتمين بفهم نشأة رواسب الخامات إلى إجراء المزيد من الأبحاث، التي تركز على فهم أنواع هذه المحاليل ودورها في تكوين الرواسب المعدنية. تتم عملية التمعدن (mineralization) في الأعماق تحت سطح الأرض، حيث لا يستطيع أن يراها أحد. مع الوقت، وبفعل عمليات جيولوجية وتكتونية معينة، يحدث رفع لهذه الرواسب إلى سطح الأرض، حيث لا توجد هذه المحاليل الحرمائية، ولكن تتبقى آثار دورها في تركيز الخامات. رغم ما بذله العديد من العلماء من جهد في فهم العديد من عمليات التغاير والترسيب بشكل تفصيلي، إلا أن هذه النقطة تحتاج إلى المزيد من الأبحاث. تعتبر دراسة المكتنفات السائلة (fluid inclusions) من الدراسات التي ساهمت بقدر كبير في فهم تركيب وصفات المحاليل الحرمائية. تمثل المكتنفات السائلة سوائل متبقية من المحاليل الحرمائية، والتي تم حبسها كمتنفات داخل بعض المعادن. دلت هذه الدراسات على أن درجة حرارة المحاليل الحرمائية تتراوح بين ٥٠ إلى ٤٥٠

درجة مئوية. كما أوضح تحليل سوائل المكتنفات أنها تتكون أساسًا من مياه ذات ملوحة تزيد عن ملوحة مياه البحر. مازالت كيميائية المحاليل الحارة، وميكانيكية ترسيب معادن اليورانيوم منها نقطة نقاش بين العلماء في الوقت الحاضر (Rubin, 1993، وLumpkin and Ewing, 1996، و Williams *et al.*, 2001، داود وآخرون ٢٠٠٤م، عبد النبي وداود ٢٠٠٨م، عبد النبي ٢٠٠٨م، وعبد النبي ٢٠٠٩م). يتطلب فهم كيفية نشأة خام اليورانيوم، بفعل المحاليل الحرمائية، معرفة النقاط الثلاثة الأتية:

١- الخصائص الفيزيوكيميائية (physicochemical) للمحاليل التي أدت إلى حركة اليورانيوم.

٢- كيفية انتقال اليورانيوم، والهيئة التي يكون عليها من معقدات اليورانيوم.

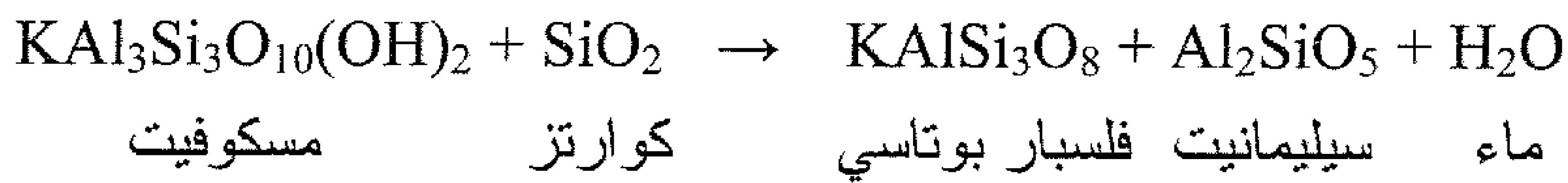
٣- كيفية ترسب اليورانيوم من المحاليل.

لقد أصبحت فكرة أن الفلزات، والمكونات الأخرى بالمحاليل المائية مصدرها هو التبلور التجزيئي لصهير سيليكاتي غير مقنعة لكثير من العلماء، حيث لا يمكن تطبيقها على كثير من الرواسب غير المصاحبة للصخور النارية، والبديل لذلك كمصدر لهذه الفلزات في المحاليل، هو الصخور التي تمر من خلالها هذه المحاليل. تتخلل المحاليل الحرمائية إلى الصخر من خلال ما به من مسام أو كسور، حيث إنها تجعل بعض مكوناته في صورة ذائبة، يسهل حملها ونقلها إلى المكان التي ستستقر فيه. وعلى الجانب الآخر فإن هناك العديد من العناصر ذات الروابط الكيميائية القوية بالبنية البلورية لمعادن الصخر، يصعب إذابتها بفعل المحاليل الحرمائية. لكي تتأثر هذه المعادن بشكل ما بهذه المحاليل، فلابد أن يحدث لها تغيرات سابقة لدور المحاليل الحرمائية، كي تُخرج ما تحتويه

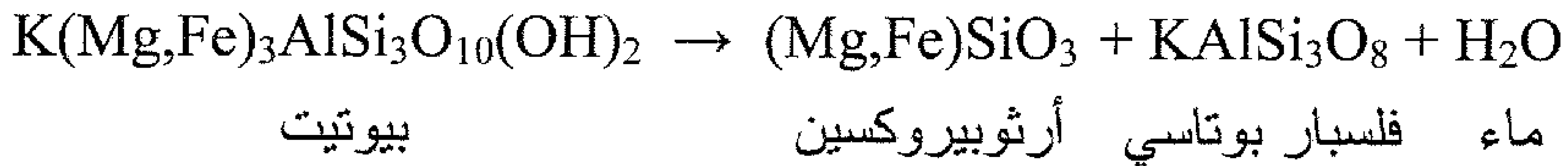
ببنيتها البلورية. يمكن أن تتم هذه التغيرات أثناء عمليات التحول، أو التغاير بفعل المحاليل الحرمائية، أو بفعل الانهيار الذري للمعدن من تأثير محتواه من العناصر المشعة (metamictization).

٤-١- نشأة المحاليل الحرمائية Origin of the Hydrothermal Solution

هناك ثلاث مصادر أساسية للمحاليل الحرمائية: يرجع المصدر الأول إلى الصخور النارية نفسها، حيث تُخرج محتواها من الماء أثناء المراحل المتأخرة من عملية التبريد. ويرجع المصدر الثاني إلى المحاليل الناتجة عن التفاعلات التحولية، والتي تعرف بتفاعلات اللاهدرجة (dehydration) أثناء عمليات التحول. مع ارتفاع درجة حرارة التحول، فإن المعادن المهدرجة (hydrous) المبكرة، والمتكونة عند درجات حرارة منخفضة تتحول إلى معادن لاحقة، غير مهدرجة (anhydrous)، مرتفعة الحرارة. مثال لعملية اللاهدرجة:

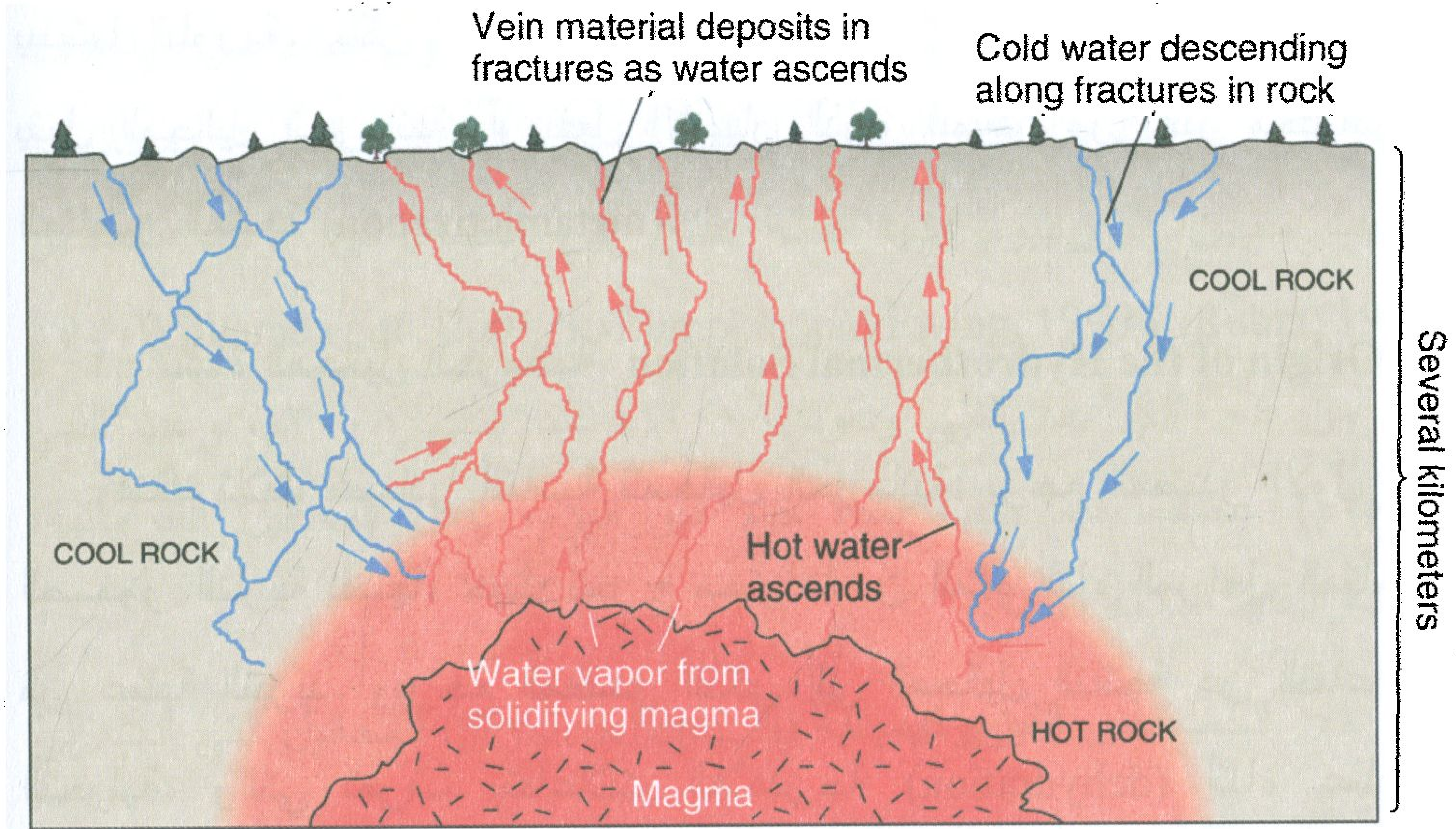


$$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + SiO_2 \rightarrow KAlSi_3O_8 + Al_2SiO_5 + H_2O$$



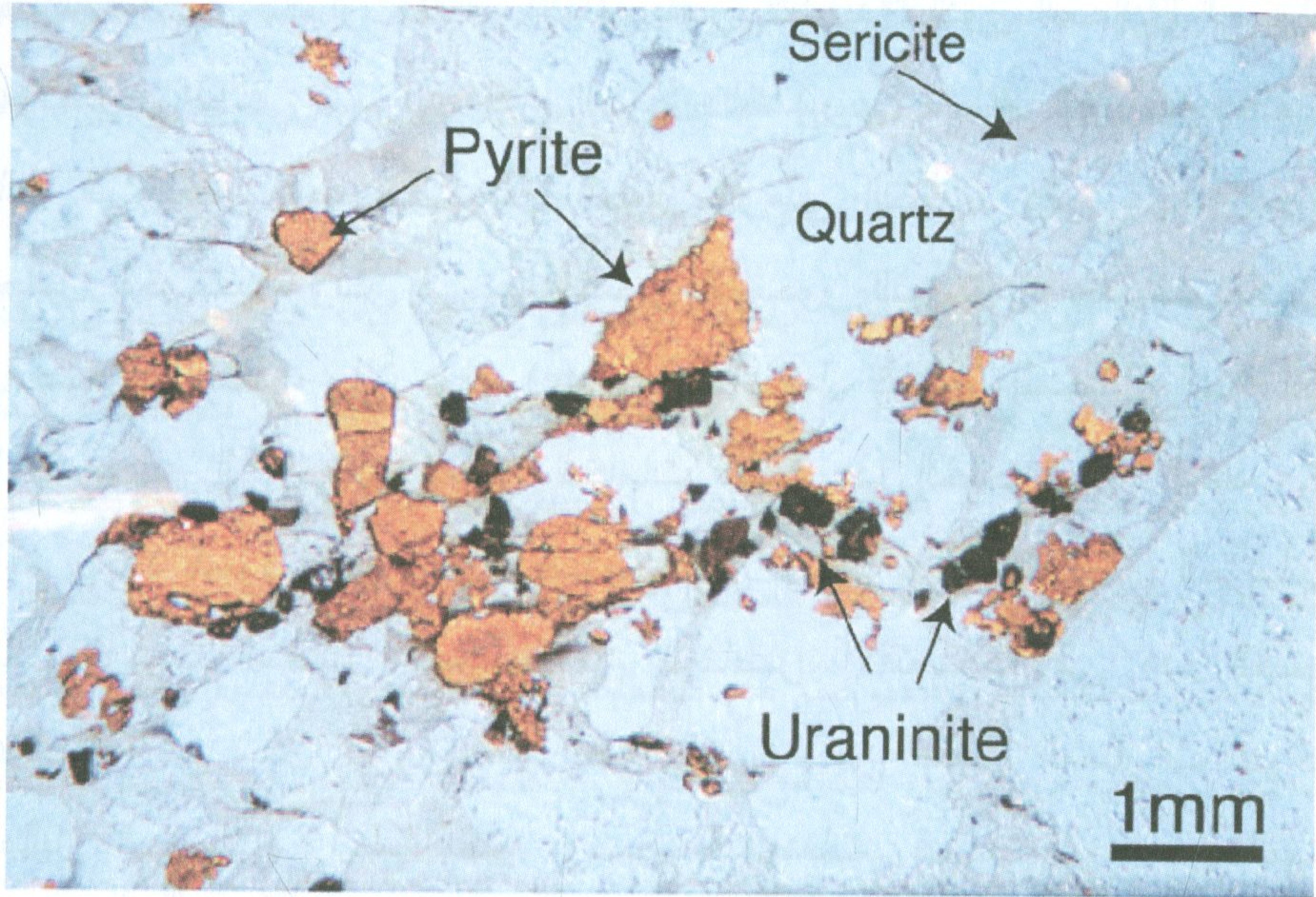
$$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 \rightarrow (Mg,Fe)SiO_3 + KAlSi_3O_8 + H_2O$$

تمثل مياه الأمطار (meteoric water) المصدر الثالث، حيث أنها تتغلغل في أعماق الأرض من خلال الفواصل والفوالق، وتختلط مع المحاليل الساخنة (juvenile) الناتجة عن العمليات الصهيرية، أو الناتجة عن عمليات التحول (شكل ٢-٣). قد يؤدى ذلك إلى تغير في درجة حرارة وكيميائية المحاليل الساخنة، مما يساعد على ترسيب حمولتها وتكوين معادن خامات.



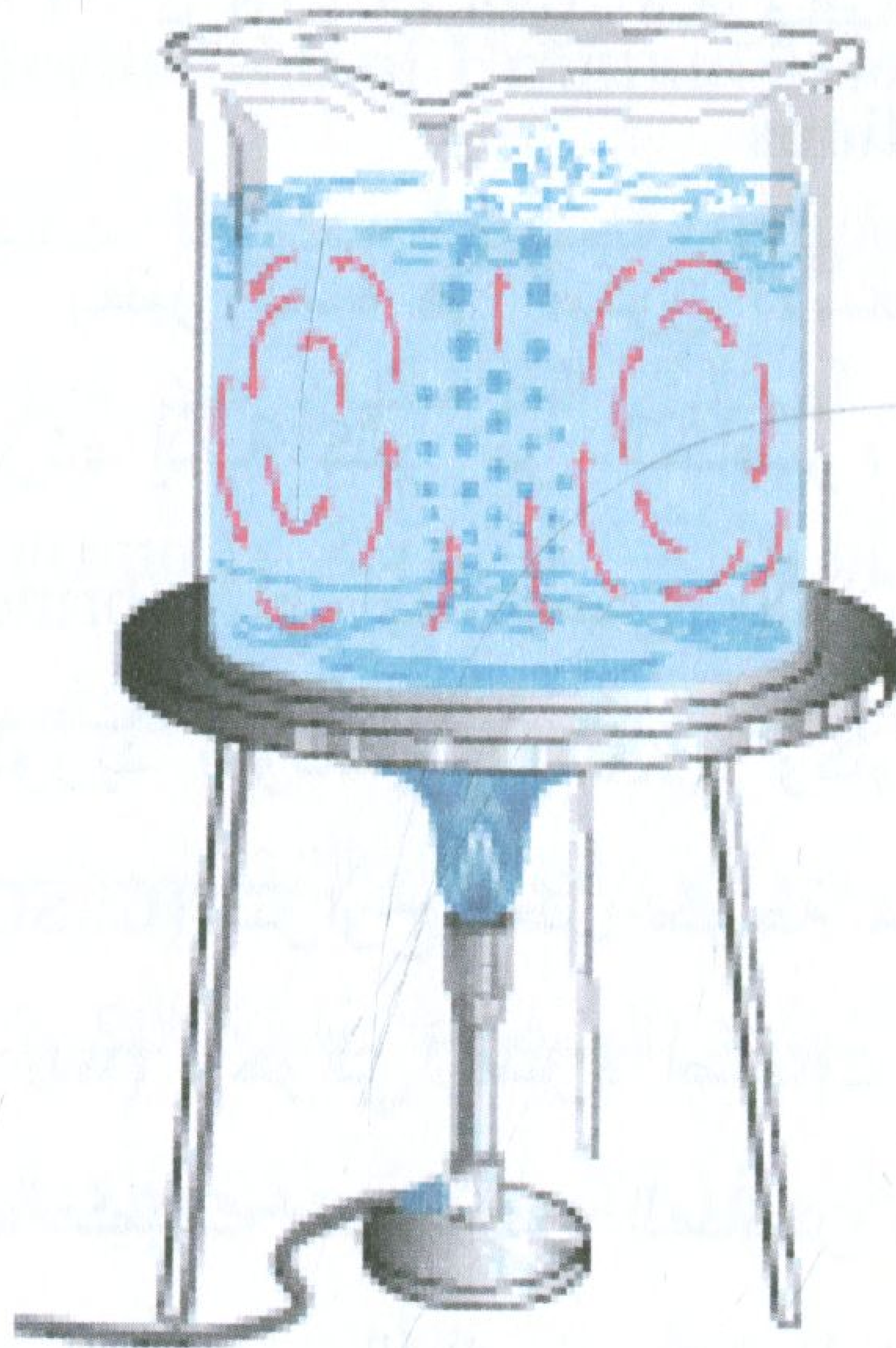
شكل ٢-٣: مصادر المحاليل الحرمائية.

تتحرك المحاليل الحرمائية الناتجة خلال الصخور المحيطة، وتذيب كثير من الفلزات، وتنقلها إلى مواقع يمكنها فيها تفريغ حمولتها، وترسيبها على شكل خامات اقتصادية. تتكون العروق الحرمائية عادةً، من معادن ترسبت من محاليل متأخرة لمرحلة التمايز الصهيري، قد تتعدى مرحلة البجمتة (pegmatization)، حيث يتبقى محاليل حرمائية غنية بالماء، والمتطايرات مثل الفلورين، والكلورين، والكبريت، وبعض العناصر مثل القصدير، والتنجستن، والذهب، والفضة، واليورانيوم، وعناصر أخرى لم تشترك في تكوين المعادن المبكرة من تبلور الصهير، ويرجع ذلك إلى عدم تناسب حجمها، أو شحنة أيوناتها. يمكن لمعادن اليورانيوم أن تترسب من هذه المحاليل الحرمائية ويصاحبها معادن أخرى مثل الفلوريت، والتوباز، والكاسيتريت، والبيريت، والكالكوبيريت، والكالكوسيت، والجالينا، والسفاليريت، والستيبنيت، ومعادن أخرى (شكل ٢-٤).



شكل ٢-٤: صورة ميكروسكوبية لصحبة معدنية من اليورانينيت والبيريت من منجم ستانليغ (Stanleigh)، مقاطعة إليوت ليك (Elliot Lake) (Ono, 2001).

يعتقد أن المحاليل الحرمائية في بيئات الصخور النارية المتداخلة، تدور خلال مسارات حمل (convective path)، تشبه في ذلك إناءً به ماء يغلي، حيث أن الماء الأكثر سخونة يصعد لأعلى بسرعة، مباشرة فوق مصدر التسخين (شكل ٢-٥)، بينما على سطح الإناء، تتغير طبيعة حركة الماء من الاتجاه العمودي إلى الأفقي، وفي النهاية



شكل ٢-٥: رسم يوضح مسارات تيارات الحمل الناتجة عن تسخين الماء.

تهبط مرة أخرى بجوار جدران الإناء. بنفس الطريقة، تدور المحاليل الحرمائية صعودًا وهبوطًا في صخور مكان التداخل الصهيري. تساعد المسامية والنفادية العالية في بعض الصخور، مثل الحجر الرملي الخشن، على سرعة حركة المحاليل الحرمائية. ولكن في حالة بعض الصخور التي تتميز بضعف نفاذيتها، مثل صخور الطفلة، والأردواز (slate) فإنها تعمل كحاجز للمحاليل الحرمائية، مما قد يؤدى إلى تركيز بعض الخامات خلف هذا الحاجز غير المنفذ. كما يساعد وجود كسور، وفواصل، وصدوع على تسهيل حركة المحاليل الحرمائية. أحيانًا، ترسب المحاليل حمولتها من العناصر الاقتصادية في هذه الكسور والفواصل، في شكل عروق. تعد نطق التصدع من أفضل المسارات لحركية المحاليل الحرمائية وأيضًا مكان ترسيب التمعدنات. قد ينتج نوع من التهشم بنطاق الصدع وتكّون ما يعرف بالبريشيا الصدعية، والتي تعتبر في هذه الحالة مشاركًا قويًا لتمعدنات الإحلال.

٤-٢- تركيب المحاليل الحرمائية

Composition of the Hydrothermal Solutions

يعتبر الماء هو المكون الأساسي لهذه المحاليل، ولكن الماء النقي لا يستطيع بمفرده إذابة كثير من العناصر، ولذلك تكون المحاليل الحرمائية عادةً ملحية (brines)، أي بها بعض الأملاح الذائبة، مثل كلوريد الصوديوم ($NaCl$)، وكلوريد البوتاسيوم (KCl)، وكلوريد الكالسيوم ($CaCl_2$)، وكبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$). تتراوح معدل ملوحة هذه المحاليل بين ملوحة البحر (٣,٥ في المائة wt. %) وحوالي عشرة أضعاف ملوحة البحر. تستطيع هذه المحاليل الملحية إذابة كميات بسيطة من العناصر مثل: اليورانيوم، والذهب، والفضة، والنحاس، والرصاص، والزنك. يساعد ارتفاع درجة حرارة هذه المحاليل على زيادة قدرتها على الإذابة. نستطيع معرفة تركيب، ودرجة حرارة هذه المحاليل

بالصخور القديمة، من خلال دراسة ما بها من مكتنفات سائلة. هذه المكتنفات عبارة عن جيوب قامت بحبس المحاليل داخل البنية البلورية للمعادن، مثل الكوارتز، الذي يمكن أن يتكّون في نفس وقت تكّون الخام.

تساعد دراسة المكتنفات السائلة بالصخور النارية، في الحصول على معلومات عن أقل درجة حرارة وصل إليها الصخر قبل تبريده. كما تلعب دراسة المكتنفات دورًا هامًا في مجال الاستكشاف عن الخامات الاقتصادية، حيث يمكن قياس درجة حرارة المحاليل المساهمة في تكّون الخام من خلال ما يحتويه من مكتنفات، وخصوصًا مع استخدام مخططات الصنف، والتي توضح كيف يتم ترسيب معدن ما، عند درجة حرارة وضغط معينين. من المهم أن نتأكد من أن هذه المكتنفات السائلة أولية النشأة، أي أنها نشأت في نفس وقت نشأة المعدن، وليست ثانوية، أي أنها لاحقة بعد نشأة المعدن.

٤-٣- ميكانيكية حركية اليورانيوم بواسطة المحاليل الحرمائية
Mechanism of Uranium Mobilization by Hydrothermal Fluids

عادةً يصاحب عملية تموضع (emplacement) الصهير صدوعًا جانبية عميقة، تعمل هذه الصدوع كمسارات لانطلاق المحاليل الحرمائية. عند مرور هذه المحاليل بالصخور الجرانيتية، أو البركانية الرسوبية (volcano sedimentary) المحيطة، فإن هذه المحاليل تعمل على تحريك بعض العناصر من هذه الصخور مثل: الكالسيوم، والصوديوم، واليورانيوم، والتيتانيوم، مما يؤدى إلى إثرائها في هذه المحاليل وانتقالها. تساعد الصدوع سابقة التكوين، والصخور عالية النفاذية، على حركية هذه المحاليل تحت ظروف فيزيائية وكيميائية معينة. يؤدي ترسيب بعض عناصر، ونزع البعض الآخر من الصخر إلي حدوث عملية تحوال قلوي (alkali-metasomatism)، يصاحبها تمعدنات

لليورانيوم. تتم عملية التفاعل التبادلي بين المحاليل، وحوائط مسارات هذه المحاليل بالصخر أثناء صعودها لأعلى، حيث تتعرض هذه المحاليل إلى نوع من الاتزان الكيميائي، والنظائري، والحراري. يتم التبادل التفاعلي بين المحلول والصخر عن طريق عمليتين :

١- الترشيح الداخلي (infiltration) للمحاليل بداخل الصخر، عن طريق ما به من كسور دقيقة وفواصل، أو من خلال الفراغات بين حبيبات المعادن (المسام).

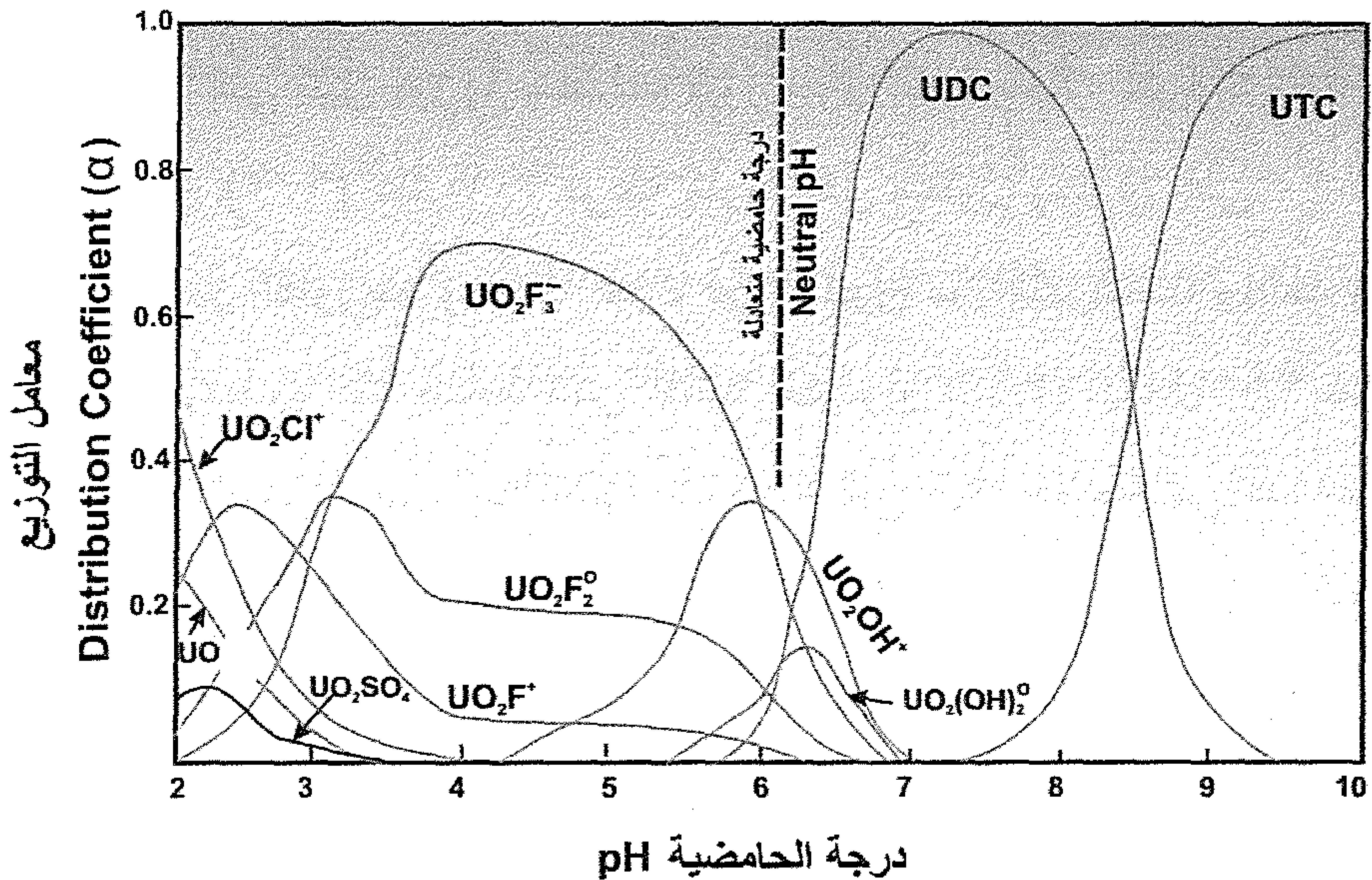
٢- انتشار (diffusion) للأيونات من جراء تغلغل المحاليل خلال المسام (static pore fluids).

يتحكم في سيادة أي من هاتين العمليتين، الاتزان بين نفاذية المحلول ومعدل انتشاره خلال حواف الحبيبات بجدار الصخر. لقد تم مناقشة حركية اليورانيوم والثوريوم، وما يصاحبهما من عناصر أخرى (مثل الزركونيوم Zr، والهافنيوم Hf، والنيوبيوم Nb، والتنتالوم Ta) بواسطة العديد من العلماء (Rubin *et al.,* 1993). لقد أظهرت الأدلة أن كثيرًا من العناصر التي كان يعتقد أنها غير متحركة (immobile elements)، يمكن أن تكون متحركة إلى حدٍ ما، أثناء عملية التغاير الحرمائي. لقد اتضح ذلك في أنواع مختلفة من الأنظمة الحرمائية بالبيئات تحت البحرية (submarine) الحديثة، والقديمة، وما يصاحبها من الرواسب الكبريتيدية الكتلية (massive sulfide deposits) (Nesbit *et al.,* 1999).

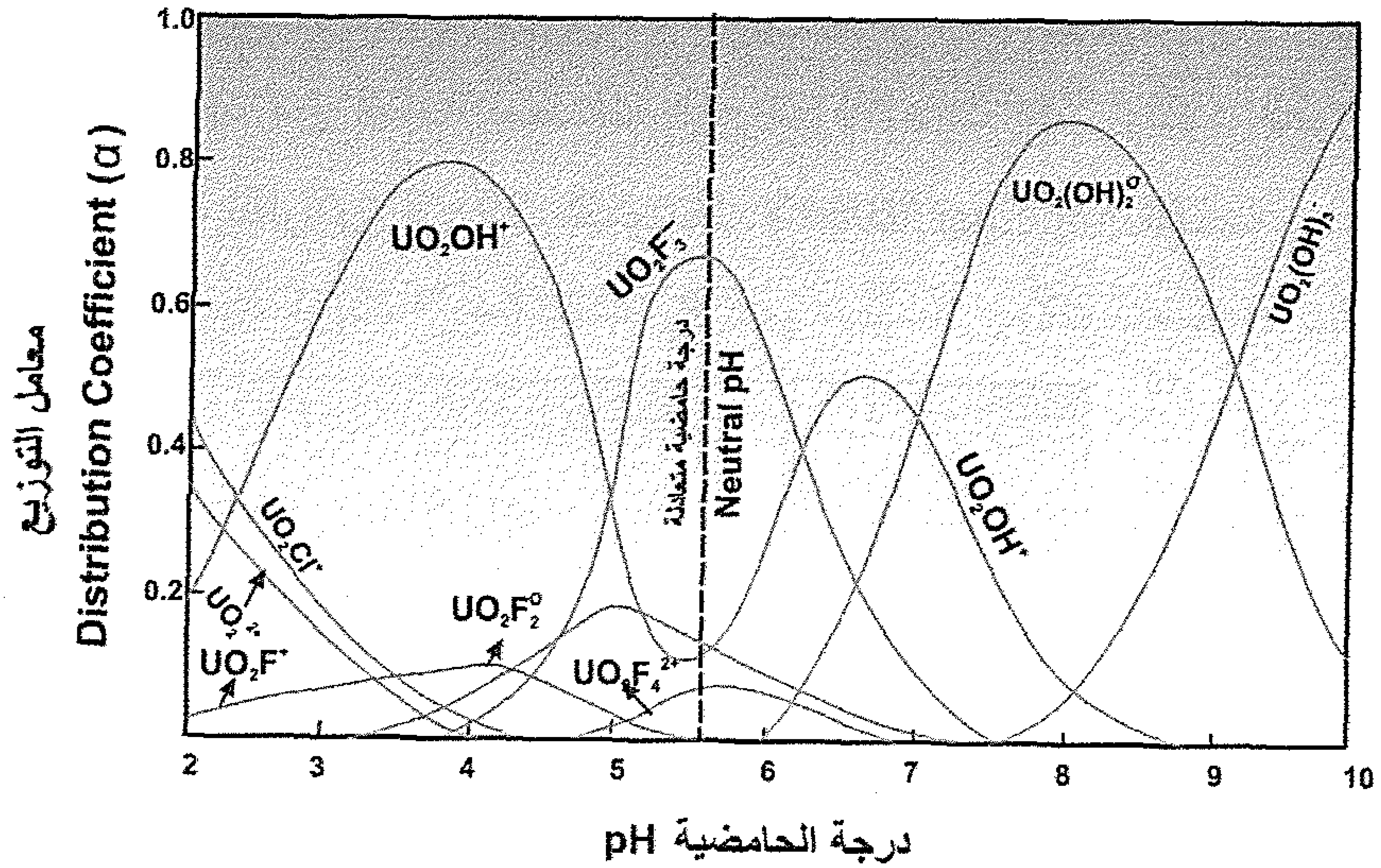
لكي يتم تقييم حركية وانتقال العناصر بفعل المحاليل الحرمائية، فإنه من الضروري تقييم المعقدات المختلفة التي تكونت بفعل هذه العناصر وخصوصًا اليورانيوم. هناك العديد من المعقدات (complexes) المعروفة لليورانيوم الرباعي

U^{4+}، واليورانيوم السداسي U^{6+}، مثل: الكبريتات، والكربونات، والفوسفات، والكلوريد، والفلوريد. فهناك حوالي ٤٣ معقد يورانيوم (Romberger, 1984)، تعتمد أهمية كل واحد من هذه المعقدات على درجة حرارة، وتركيب المحلول المائي. يمكن معرفة مدى استقرارية الأنواع المختلفة من معقدات اليورانيوم من خلال مجموعة من المخططات التي تبين العلاقة بين معامل التوزيع (α)، ودرجة الحامضية (pH)، عند درجة حرارة وتركيز ثابت لمكونات المعقد. يمكن تعريف معامل التوزيع، على أنه نسبة اليورانيوم في المعقد إلى المقدار الكلي لليورانيوم في المحلول. يعتمد نشاط أنيونات المعقدات (complexing anions)، مثل الفلورين (F)، والفوسفات (HPO_4^{2-})، والكربونات (CO_3^{2-})، على كل من درجة الحرارة، والحامضية. يمثل شكلي (٢-٦ و ٢-٧) مثالين من العديد من المخططات، التي تبين توزيع معقدات اليورانيوم عند درجات حرارة معينة. تم استنباط شكل (٢-٦) عند ١٠٠ درجة مئوية، في محلول يحتوي على ١٠ جزء في المليون من الفلوريد، و ١٠٠ جزء في المليون من الكبريتات، وواحد مللي كلوريد الصوديوم، عند ضغط ثاني أكسيد الكربون (P_{CO2}) يعادل ١,٠ ضغط جوي (atm). تصل معدل الحامضية المتعادلة إلى ٦,١. نلاحظ في هذا الشكل أن معقدات كربونات اليورانيوم الثنائية (UDC)، وكربونات اليورانيوم الثلاثية (UTC)، تسود في المنطقة القلوية، بينما تسود معقدات فلوريد، وكلوريد، وكبريتات اليورانيوم في المنطقة الحامضية من هذا المخطط (درجة حامضية أقل من ٦). على عكس ذلك، نجد أن معقدات هيدروكسيد اليورانيوم، تكون أكثر استقرارًا، وتظهر في درجة الحامضية المتعادلة، رغم انخفاض نشاط أيون الهيدروكسيل. يوضح الشكل (٢-٧) توزيع معقدات اليورانيوم عند درجة حرارة أعلى من المخطط السابق (شكل ٢-٦). نلاحظ من هذا الشكل أن

معقدات الكربونات أصبحت غير ذات أهمية، حتى تحت ظروف المحاليل القلوية، ينتج عن ذلك انخفاض نشاط أنيون الكربونات (CO_3^{2-})، والناتج عن انخفاض ثابت التأين لحامض الكربونيك عند درجة حرارة ٣٠٠ درجة مئوية. على عكس ذلك نجد أن معقدات الفلوريد تكون أكثر أهمية عند المنطقة المتعادلة (حوالي ٥,٥ درجة حامضية، وعند ٣٠٠ درجة مئوية). كما نلاحظ في هذا الشكل، أن معقدات الهيدروكسيل تسود في نطاق واسع من درجة الحامضية. يرجع ذلك إلى ارتفاع استقرارية معقدات هيدروكسيل اليورانيوم، مع ارتفاع درجة الحرارة، حيث تقل إمكانية تواجد المعقدات الأخرى.



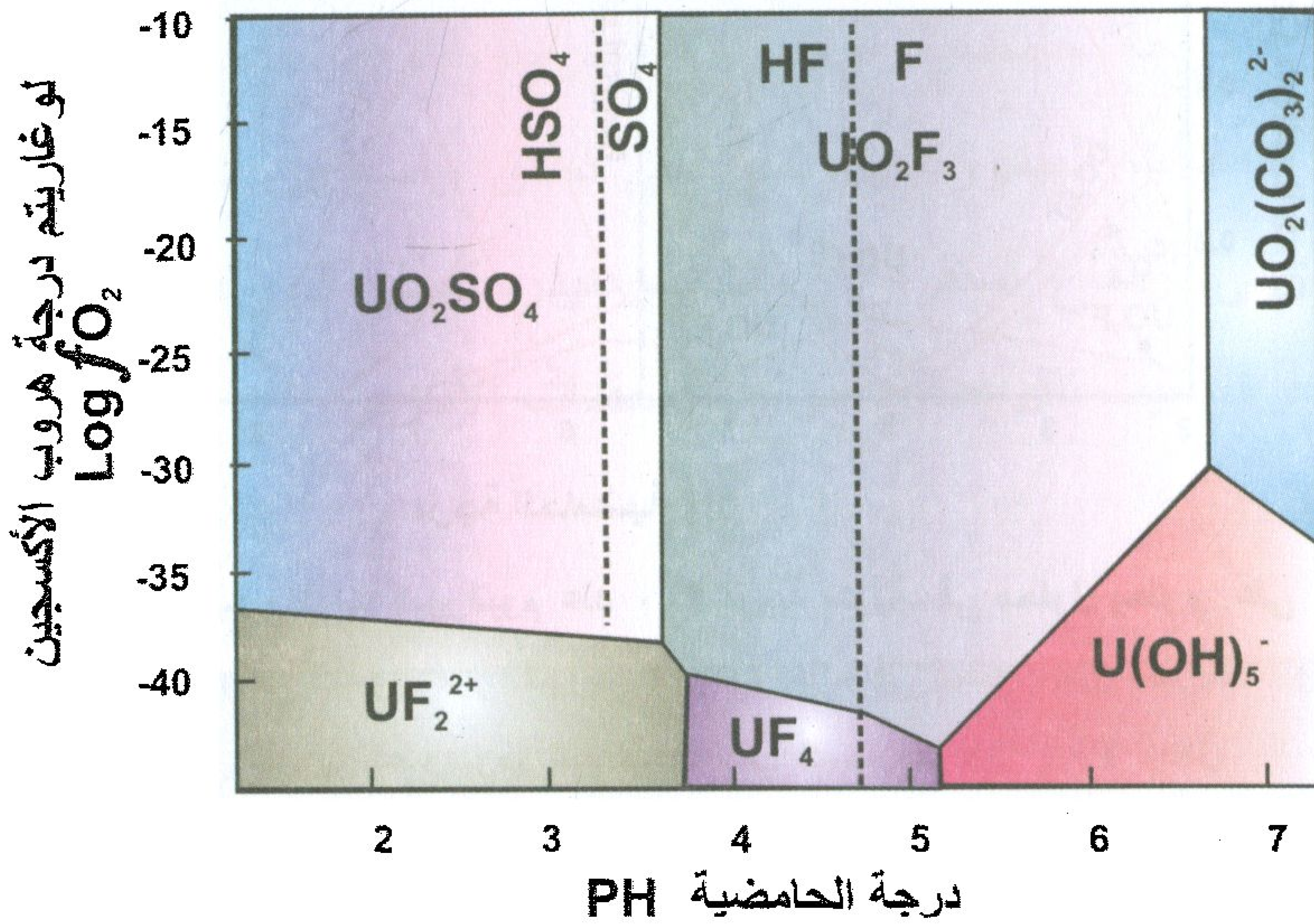
شكل ٢-٦: توزيع معقدات اليورانيوم عند ١٠٠ درجة مئوية، فى محلول يحتوي على ١٠ جزء فى المليون من الفلوريد، و ١٠٠ جزء فى المليون من الكبريتات، وواحد مللي كلوريد الصوديوم، عند ضغط ثانى أكسيد الكربون P_{CO2} يعادل ٠,١ ضغط جوى (Romberger, 1984).



شكل ٢-٧: توزيع معقدات اليورانيوم عند ٣٠٠ درجة مئوية، فى محلول يحتوي على ١٠٠ جزء فى المليون من الفلوريد، و ١٠٠ جزء فى المليون من الكبريتات، وواحد مللي كلوريد الصوديوم، عند ضغط ثانى أكسيد الكربون P_{CO2} يعادل ١٠ ضغط جوى (Romberger, 1984).

يوضح شكل (٢-٨) تأثير كل من درجة هروب الأكسجين (oxygen fugacity, Log fO_2)، ودرجة الحامضية، على درجة ذوبانية اليورانيوم عند درجات حرارة معينة. كما يوضح الشكل مدى استقرارية معقدات اليورانيوم عند درجة حرارة ٢٠٠ درجة مئوية، في محاليل تحتوى على ١٠٠ جزء في المليون من الفلوريد، و ١٠٠٠ جزء في المليون من الكبريت، وواحد مللي كلوريد صوديوم، وضغط لثاني أكسيد الكربون (P_{CO2}) يعادل ١٠ ضغط جوي. نجد في هذا الشكل، أن معقدات الكبريتات تسود عند قيم هروب للأكسجين عالية، وفي محاليل حامضية، ولكن تكون معقدات الفلوريد ذات أهمية عند درجة حامضية تتراوح بين حامض ضعيف إلى قلوي ضعيف، بينما تسود معقدات الكربونات عند درجة حامضية أعلى تقريبًا من ٧. يظهر العديد من معقدات الفلوريد،

والهيدروكسيل عند درجات هروب للأكسجين منخفضة. يظهر نشاط معقدات الفلوريد في العديد من أنظمة تمعدنات اليورانيوم، حيث يكثر وجود الفلوريت، والمعادن الحاملة للفلورين في هذه التمعدنات (Romberger, 1984).



شكل ٢-٨: مخطط ثنائي لدرجة الحامضية ودرجة هروب الأكسجين يبين توزيع معقدات اليورانيوم عند درجة ٢٠٠ °م، بمحلول يحتوي على ١٠٠ جزء فى المليون من الفلوريد، و١٠٠٠ جزء فى المليون من الكبريت، وواحد مللى كلوريد صوديوم، وضغط لثانى أكسيد الكربون P_{CO2} يعادل ١٠ ضغط جوي **(Romberger, 1984)**.

٤-٤- أسباب ترسيب اليورانيوم من المحاليل الحرمائية

Causes of Uranium Precipitation

غالبًا ما يحدث الترسيب عندما يزيد مقدار المكونات الذائبة في المحلول الحرمائي عن حد ذوبانها (solubility limit). هناك العديد من العوامل التي تساعد في عملية الترسيب:

١- زيادة تركيز المادة الذائبة في المحلول.

٢- انخفاض درجة الحرارة، أو الضغط.

٣- التفاعل مع الصخور، أو المعادن المحيطة.
٤- الخلط مع محاليل أخرى.

في الحقيقة، أن فهم التفاعلات التي تتم لإذابة، ونقل، وترسيب معقدات اليورانيوم، ليست بالأمر السهل، ومازال هناك أمورًا كثيرة غير مفهومة. يعتمد مدى تركيز الخام المترسب من المحاليل الحرمائية على معدل تدفقه. مثلاً، لو أن المحلول الحرمائي يتحرك ببطء إلى أعلى بالقشرة الأرضية، فإن معدل التبريد يكون بطيئًا، وبالتالي، فإن ترسيب المعادن المذابة سيتم على نطاق ومسافات شاسعة بالصخر، ومن ثم لا يتكون خامًا بالمعني الاقتصادي. ولكن إذا كانت حركة هذه المحاليل سريعة من خلال كسور، أو صخور عالية النفاذية، فإنها قد تتعرض إلى تبريد مفاجئ، ومن ثم ترسب كل حمولتها المذابة في مساحة صغيرة، على شكل عروق غنية بالمعادن الاقتصادية، حيث يكثر وجود هذه العروق في مناطق النشاط البركاني.

٤-٥- أنواع التغاير الناتج بفعل المحاليل الحرمائية

هناك العديد من أنواع التغاير (alteration) المعدنية التي تطرأ على الصخور بفعل المحاليل الحرمائية. سنستعرض فيما يلي وصفًا لبعض الأنواع ذات العلاقة بتمعدنات اليورانيوم.

التغاير البوتاسي Potassic Alteration

يعد التغاير البوتاسي من أنواع التغاير التي تتم عند درجات الحرارة العالية، وينتج عنه إثراء الصخر بعنصر البوتاسيوم. يمكن أن يتم هذا النوع من التغاير في المراحل المتأخرة من تبلور الصهير، وقبل أن يحدث تبلور كامل له، من خلال شبكة من العروق المتقطعة (discontinuous vein type). قد يحدث هذا التغاير بالصخور الجوفية العميقة، حيث يتكون الأرثوكليز. قد يتم أيضًا في

البيئات البركانية الضحلة، حيث تتكون الأديولاريا (Adularia). تعتبر منطقة أم أرا، بجنوب الصحراء الشرقية المصرية، من الأمثلة الجيدة لدور التغاير البوتاسي في نشاة تمعدنات اليورانيوم. صاحب عملية التغاير البوتاسي إحلالاً لكل من البوتاسيوم، والرابيديوم، والرصاص، محل الصوديوم والكالسيوم، مع تكّون الميكروكلين على حساب البلاجيوكليز، كما هو واضح من المعادلة التالية:

$$2NaCa(Al_3Si_5O_{16})+K^+ + 8SiO_2 \rightarrow 6KAlSi_3O_8 + 2Na^+ + 2Ca^{2+}$$

Albite-oligoclase Microcline

التغاير الألبيتي أو الصودي Albitic or Sodic Alteration

يشابه هذا النوع من التغاير النوع السابق (التغاير البوتاسي) من حيث درجات حرارة المحاليل، والعمق، الذي يتم عنده. ينتج عن هذا التغاير تكّون معدن الألبيت (بلاجيوكليز صودي) على حساب الفلسبار البوتاسي، كما هو واضح من المعادلة التالية. يصاحب الألبيت تكّون معادن أخرى مثل الفلوريت والميكا البيضاء.

$$2KAlSi_3O_8 + 2\ NaCaAl_3Si_5O_{16} + 6Na^+ + 8SiO_2 + 4HF \rightarrow$$

Microcline Albite-oligoclase



$$8NaAlSiO_8 + 2CaF_2 + 2K^+ + 4H^+$$

Albite Fluorite

التغاير السيليكاتي (السلكتة) Silicification

السلكتة هي تكوّن السيليكا نتيجة عملية تكسير المعادن الأولية، وخروج السيليكا منها في صورة معدن الكوارتز (SiO_2)، أو من ترسيب السيليكا مباشرة من المحاليل. يعتبر هذا التغاير من أكثر الأنواع شيوعًا، ويتواجد على أشكال مختلفة. يسمى أكثر هذه الأشكال شيوعًا بالفيضان السيليكاتي (silica flooding)، والذي ينتج عن استبدال الصخر بكوارتز دقيق التحبب (كالسيدوني

chalcedony). يساعد على إتمام هذه العملية وجود شبكة من الكسور المتقاربة بالصخر، حيث تمتلئ هذه الكسور بالكوارتز مكونةً ما يعرف بالعروق الشبكية (stockwork). يمكن أن يتم هذا النوع من التغاير على مدى واسع من درجات الحرارة.

التغاير الكربوناتي (تكوّن معادن الكربونات) Carbonatization

يصاحب هذا النوع من التغاير إضافة، أو تكوّن، أي نوع من معادن الكربونات في الصخر، من أشهرها الكالسيت، والأنكيريت (ankerite)، والدولوميت. كما يصاحب التغاير الكربوناتي تكوّن معادن أخرى مثل الكلوريت، والسيريست (sericite)، والألبيت. يمكن أن يكّون التغاير الكربوناتي نمطًا نطقيًا (zonal pattern) حول رواسب الخام، مع وجود أنواع أخرى من المعادن الغنية بالحديد، بالقرب من الخام.

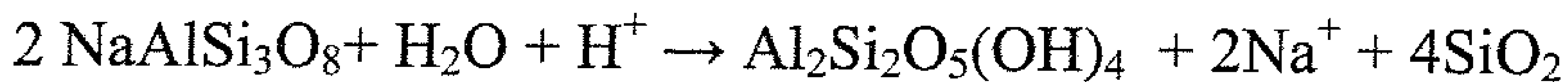
التغاير الطيني (تكوّن المعادن الطينية) Argillic Alteration

يصاحب هذا النوع تكوين نوع، أو أكثر، من المعادن الطينية إلى الصخر، مثل الكاولينيت، والسميكتيت (smectite)، والإليت (illite). غالبًا ما يحدث هذا النوع من التغاير في ظروف درجات الحرارة المنخفضة (حوالي ١٠٠ درجة مئوية)، وقد يحدث بعضها تحت ظروف الغلاف الجوي (عملية التجوية). يؤدى هذا التغاير إلى اختفاء الفلسبار البوتاسي، أو البلاجيوكليز، وتغايره إلى معادن طينية، كما هو واضح من المعادلات التالية:



$$2\,KAlSi_3O_8 + 9\,H_2O + 2\,H^+ \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2\,K^+ + 4\,H_4SiO_4$$

K-feldspar فلسبار بوتاسي — kaolinite كاولينيت — polysilicic acid



$$2\,NaAlSi_3O_8 + H_2O + H^+ \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na^+ + 4SiO_2$$

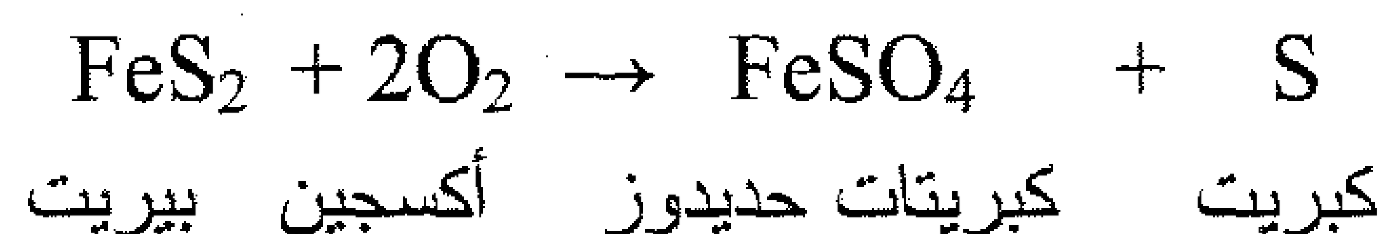
albite ألبيت — kaolinite كاولينيت — silica

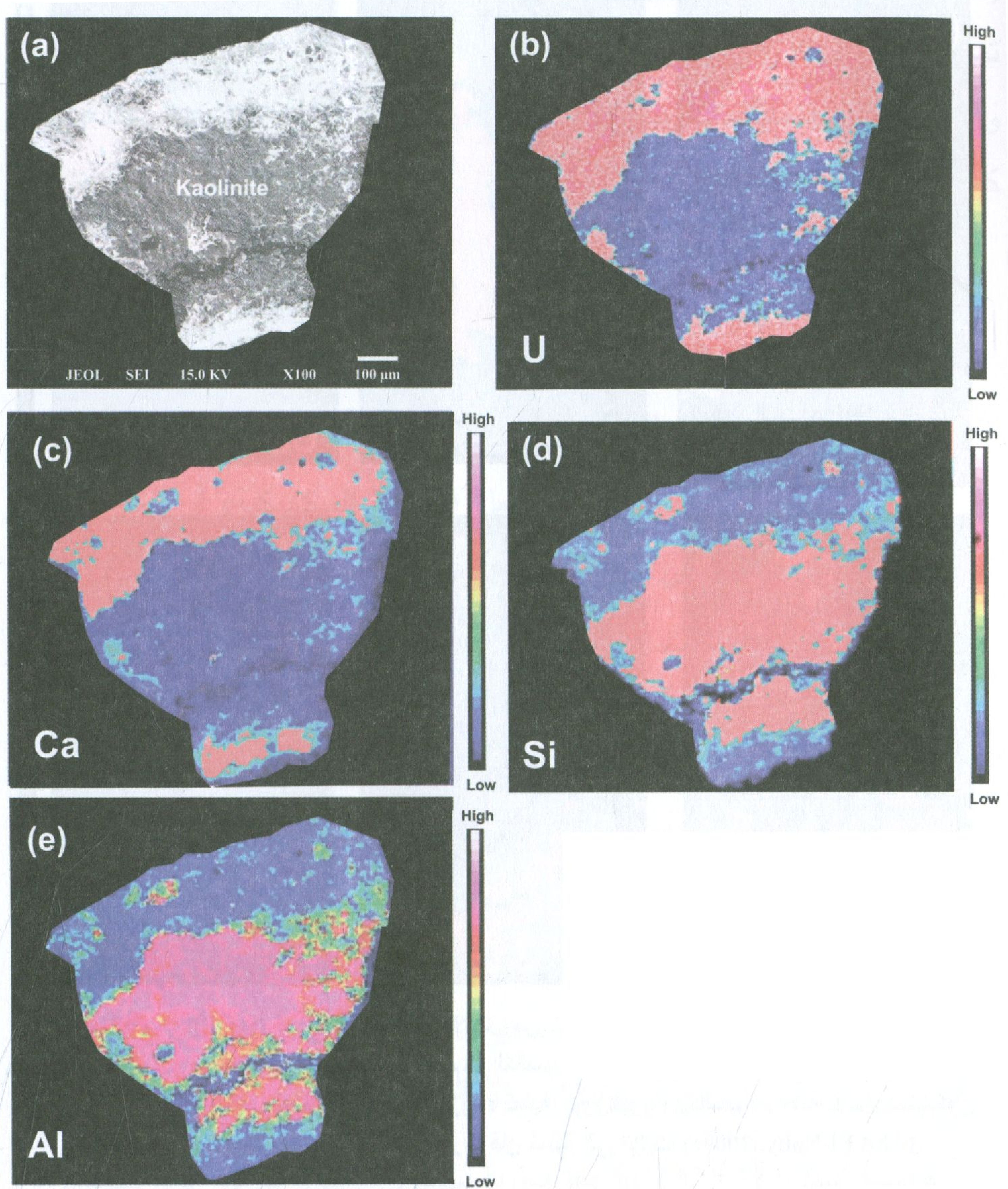
يصاحب الكاولينت معادن أخرى مثل: الكوارتز، والهيماتيت، والليمونيت. يدل وجود هذه الصحبة المعدنية على ظروف منخفضة من درجة الحامضية. عند درجات الحرارة العالية، قد يتكون معدن البيروفيليت (الميكا البيضاء) بدلاً من الكاولينيت. هناك أمثلة عديدة لتغاير الفلسبار إلى كاولينيت، أو معادن طينية أخرى بالصخور الجرانيتية بالصحراء الشرقية بمصر، مثل منطقة أم أرا، والمسيكات، والعرضية، وجتار. كما يمكن أن يتغاير الفلسبار إلى مونتموريلونيت (Montmorillonite)، أو إليت (illite)، عند درجات حرارة أقل من ١٠٠ درجة مئوية (Mac Dowell and Elders, 1980).

تلعب المعادن الطينية دورًا هامًا في عملية ادمصاص (adsorption)، وترسيب (precipitation) اليورانيوم من المحاليل الحاملة له (Tsunashima et al., 1981، Sikalidis et al., 1989، Zachara and McKinley, 1993، Morris et al., 1994، Turner et al., 1996، Boult et al., 1998، Sylwester et al., 2000، وAbd El-Naby, 2009c). يوضح شكلا (٢-٩ و ٢-١٠) دور كل من الكاولينيت، والإليت في ترسيب معدن اليورانوفان بمناطق القص، بالصخور الجرانيتية لجبل جتار، الصحراء الشرقية، مصر.

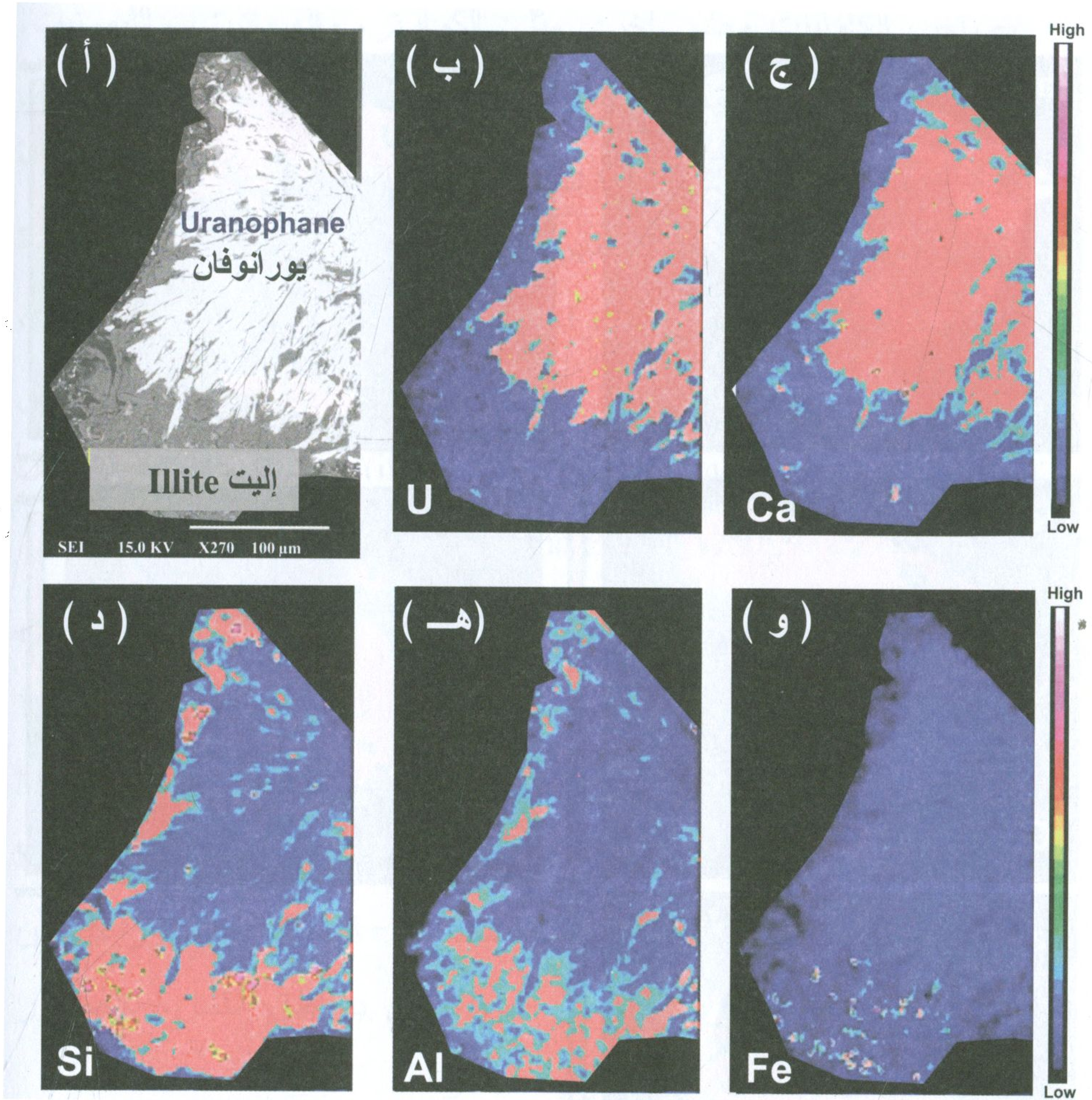
التغاير الحديدي Ferrugination

ينتج هذا التغاير عن أكسدة معادن حديدية مثل البيريت، ومعادن كبريتيدات الحديد الأخرى، وتكّون معادن أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد، مثل الهيماتيت، والجوتيت، والليمونيت. مثال : تغاير معدن البيريت حسب المعادلة التالية:





شكل ٢-٩: (أ) صورة بجهاز المسبار الإلكتروني تبين ترسيب اليورانوفان على الكاولينيت. (ب-هـ) خرائط تبين توزيع اليورانيوم، والكالسيوم، والسيليكون، والألومنيوم للصورة (أ). تدل هذه الخرائط على زيادة نسبة اليورانيوم والكالسيوم، وقلة نسبة السيليكون والألومنيوم في اليورانوفان نسبة إلى الكاولينيت (Abd El-Naby, 2009c).



شكل ٢-١٠: (أ) صورة بجهاز المسبار الإلكتروني تبين ترسيب اليورانوفان على الإليت. (ب-و) خرائط تبين توزيع اليورانيوم، والكالسيوم، والسيليكون، والألومنيوم، والحديد للصورة (أ). تدل هذه الخرائط على زيادة نسبة اليورانيوم والكالسيوم، وقلة نسبة السيليكون، والألومنيوم، والحديد في اليورانوفان نسبة إلى الإليت (Abd El-Naby, 2009c).

تذوب كبريتات الحديدوز بسهولة في الماء، حيث تتحول سريعًا إلي مواد أخري، مما يؤدي إلى تكوّن حامض الكبريتيك، الذي يذيب كثيرًا من العناصر الثقيلة بالصخور المحيطة، وقد يكون في بعض الأحيان ذو تأثير بيئي سيئ. توجد أكاسيد الحديد الناتجة عن عملية التغاير على جدران الكسور، والفواصل،

والفجوات مغطيةً جزءًا كبيرًا من الصخر. يميز هذا النوع من التغاير مناطق تمعدنات اليورانيوم بالصحراء الشرقية بمصر، مثل منطقة أم آرا، وأبو روشيد، والعطشان، وبالمملكة العربية السعودية مثل، منجم مهد الذهب، ومنطقة وادي كمال.

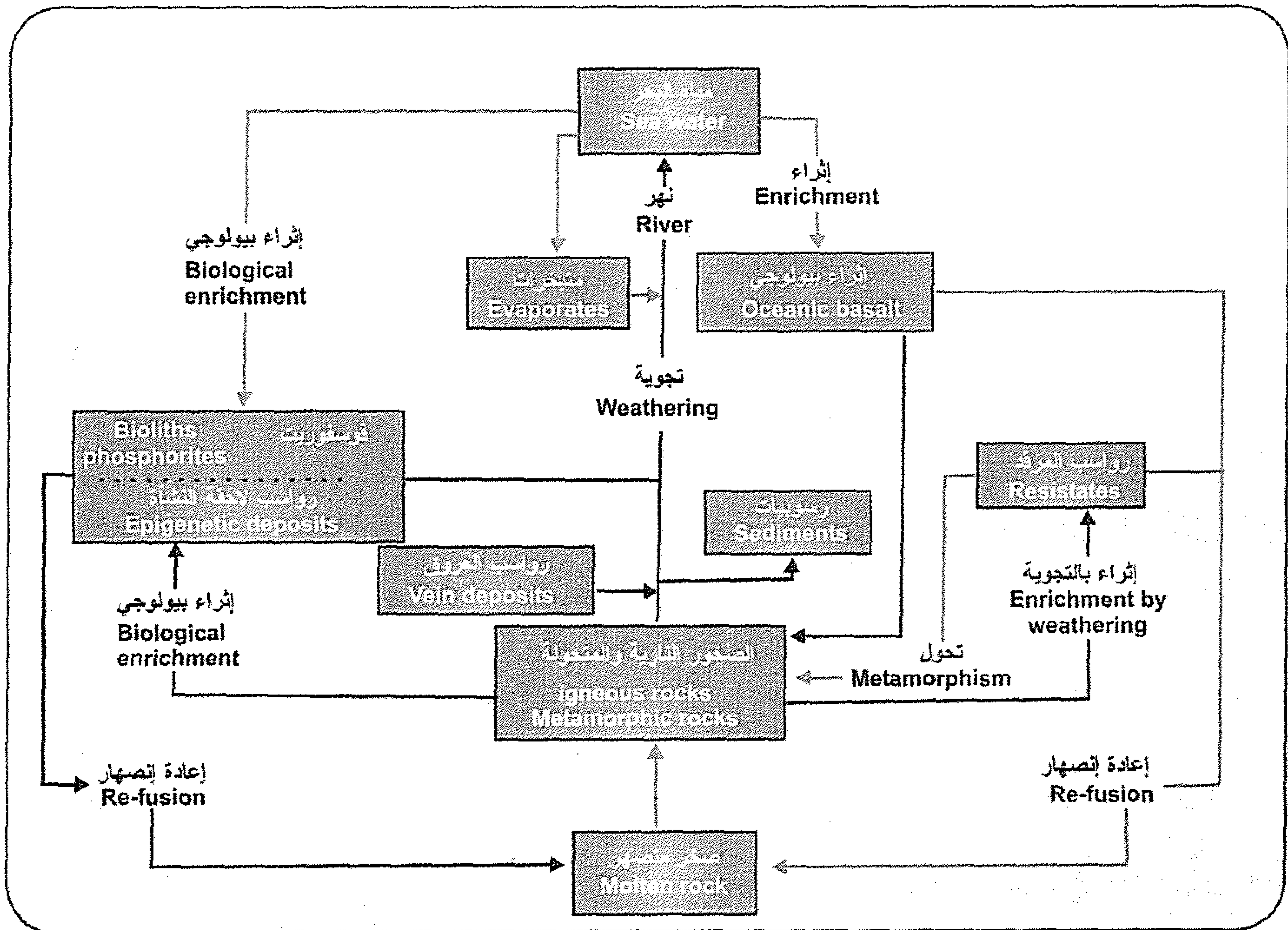
٥- سلوك اليورانيوم بالمياه الجوفية
Behavior of Uranium in Groundwater

٥-١- حركية اليورانيوم Uranium Mobilization

يمكن أن يتحرك اليورانيوم، إما بفعل التجوية الميكانيكية، أو بفعل التجوية الكيميائية. يعتمد ذلك على الصورة التي يكون عليها اليورانيوم في الصخر الأصلي. أحيانًا يوجد اليورانيوم في بعض المعادن الإضافية، مثل الزركون، وهو من المعادن الأكثر مقاومة لعمليات التجوية الكيميائية، وبالتالي فإن عملية استخلاص اليورانيوم منه بفعل عوامل التجوية، تكون في غاية الصعوبة. عندما يتعرض هذا الصخر للتجوية، فإن اليورانيوم يتحرك مع الزركون حركة ميكانيكية، ربما بفعل مياه الأنهار، أو المجاري المائية الأخرى، مكونًا ما يسمى برواسب المراقد (placer deposits). على الجانب الآخر، لو وجد اليورانيوم في صورة معادن سهلة الإذابة بالمحاليل، فإن هذه المحاليل تستخلصه، وتتحرك به مسافات إلى أن يترسب في رسوبيات مختلفة.

يوضح شكل (٢-١١) ما يعرف باسم دورة اليورانيوم. من المعلوم أن الصخور النارية الفلسية، تمثل المصدر الأساسي لليورانيوم، ويرجع ذلك إلى ما بها من معادن حاوية على اليورانيوم، وأيضًا، إلى محتواها من اليورانيوم الحر (labile U) بين مكوناتها المعدنية. تعمل المحاليل الحرمائية المتأخرة، أو الناتجة من عمليات التحول، على إذابة اليورانيوم من الصخور النارية، ونقله إلى سطح

الأرض، من خلال الكسور، حيث يمكن ترسيب بعضًا منه في الصخور الرسوبية، ليكّون رواسب صغيرة في الحجم، ولكن ذات أهمية اقتصادية. ولكن الجزء الأكبر من اليورانيوم، ربما يصل في النهاية إلى المحيطات عن طريق الروافد النهرية. تقوم الرسوبيات الغنية بالمادة العضوية، وكذلك الفوسفوريت المصاحب لها، بادمصاص بعضًا من اليورانيوم المذاب في مياه البحر. يمكن لهذه الرسوبيات أن تستخلص ما يزيد عن ١٠٪ من كمية اليورانيوم المذابة في المياه. كما أثبتت الكثير من الأبحاث أن البازلت المجوى في البيئة البحرية، يمكنه استقطاب بعضًا من اليورانيوم من مياه المحيطات (Rosholt, 1982).



شكل ٢-١١: دورة اليورانيوم The Uranium Cycle (Rosholt, 1982).

تتم حركة اليورانيوم من الصخور النارية بطريقتين:

١- تحرير اليورانيوم ذو الروابط الضعيفة (loosely bound) من الصخر، مما يسهل استخلاصه ونقله بفعل المحاليل المصاحبة، مثل اليورانيوم الموجود بين حبيبات الصخر (labile uranium).

٢- تحرير اليورانيوم من المعادن الحاوية عليه بفعل عمليات التجوية.

من الممكن أن تشترك كل من عمليات التجوية الميكانيكية، والكيميائية، في تيسير حركية اليورانيوم، فمثلاً تعتمد حركية اليورانيوم في المياه الجوفية على حالة التأكسد التي يوجد عليها، حيث تساهم كل من عمليات الأكسدة، والإذابة لمعادن اليورانيوم، في إثراء المحاليل المصاحبة باليورانيوم، سواء كانت محاليل حرمائية، أو محاليل مياه جوفية. في حالة ظروف الاختزال، فإن حركة اليورانيوم في صورته رباعية التكافؤ (U^{4+})، تكون محدودة في بضع سنتيمترات، بينما تحت الظروف المؤكسدة، فإن اليورانيوم سداسي التكافؤ (U^{6+})، يمكن أن يتحرك لمسافات قد تبلغ العديد من الكيلومترات، بعيدًا عن صخور المصدر المجواه، ثم يترسب عندما تسمح الظروف بذلك. عندما يتأكسد اليورانيوم، فإن هناك عوامل أخرى تعمل على إضافة إلكترونات له، لكي يعود إلى صورته المختزلة مرة أخرى. في بعض الأحيان تسمى هذه العملية بالأكسدة الذاتية (auto-oxidation). أثناء عملية اضمحلال اليورانيوم، فإنه يتكون الرصاص في صورته الرباعية (Pb^{4+}) والذي يكون غير مستقر في وجود اليورانيوم الرباعي (U^{4+}). في هذه الحالة، يتم اختزال الرصاص الرباعي إلى الثنائي (Pb^{2+}) ، بينما يتأكسد اليورانيوم إلى أيون اليورانيل(uranyl ion UO_2^{2+})، وبعض من معقدات اليورانيوم الأخرى. عندما يتعرض اليورانيوم المؤكسد لظروف اختزالية، فإنه يختزل ليعطي معادن اليورانينيت، والكوفينيت، والبرانيريت. تحت ظروف الأكسدة والبيئات الغنية بالمحاليل، فإن هذه المعادن

قد يتم إذابتها لتعطى معادن يورانيوم ثانوية (U^{6+}). إن فهم ظروف نشأة معادن اليورانيوم وتعرضها لعوامل التجوية، يساعد إلى حد كبير في فهم السلوك الجيوكيميائي لليورانيوم. ينتقل معظم اليورانيوم المذاب في صورة سداسي التكافؤ (U^{6+})، حيث يتحد مع الأكسجين ليكّون أيون اليورانيل (UO_2^{2+}). ينتقل اليورانيل بعد ذلك عن طريق المياه الجوفية في صورة معقدات الكربونات، أو الفوسفات، أو الكبريتات، أو الفلوريد. عادةً يتركز اليورانيوم في المياه الجوفية المؤكسدة، والقريبة من مصادر الامداد (recharging source)، بينما يقل تركيز اليورانيوم في المياه الجوفية العميقة المختزلة.

تعمل العمليات الجيولوجية على إحداث نوع من عدم الاتزان الاشعاعي (radioactive disequilibrium)، حيث أن هناك بعض الوليدات المشعة أكثر حركة من البعض الأخر ومن هنا يأتي عدم الاتزان. تلعب المياه الجوفية دورًا هامًا في هذه العملية، وذلك لما تحدثه من تفاعلات مع الصخور المحيطة. هناك طريقتان أساسيتان لمعرفة حالة الاتزان، أو عدم الاتزان. تعتمد الطريقة الأولى على قياس محتوى اليورانيوم في الخام بطريقتين:

١- قياس محتوى اليورانيوم بالتحليل الكيميائي.

٢- قياس مقدار الإشعاع الصادر من الخام، والتي تتناسب مع محتواه من اليورانيوم. يمثل المحتوى الإشعاعي المقاس أشعة جاما الصادرة من وليد اليورانيوم، والذي يعرف بالبزموث^{٢١٤} (Bi^{214})، والذي يمثل مرحلة من مراحل الاضمحلال الإشعاعي لليورانيوم^{٢٣٨} (U^{238}) (انظر شكل ١-١٠). أي إضافة أو نقص في الوليدات التي تقع بين النظير الأم (يورانيوم^{٢٣٨})، والوليد (بزموث^{٢١٤})، يسبب اختلاف بين محتوى اليورانيوم المقاس كيميائيًا، والآخر المقاس بأجهزة الرصد الإشعاعي.

نسبة عدم الاتزان = محتوى اليورانيوم مقاسًا بالطريقة الكيميائية U-chemical / محتوى اليورانيوم مقاسًا بأجهزة الرصد الإشعاعي U-Radiometric

لو أن النسبة في المعادلة السابقة:

– تساوي ١ : فإن ذلك يعني حالة اتزان، حيث أن محتوى اليورانيوم المقاس بالطريقة الكيميائية، يساوي المقاس بأجهزة مطياف أشعة جاما، مما يعني أن اليورانيوم ووليداته في حالة اتزان.

– أكبر من ١ : فإنه يمكن القول بأن عينة الخام ليست في حالة اتزان، حيث إن قيمة اليورانيوم المقاس كيميائيًا، أكبر من تلك المقاسة بأجهزة الرصد الإشعاعي، مما يعني أن هناك إضافة لاحقه لليورانيوم، أو إنه حدث هروب لبعض وليدات اليورانيوم.

– أقل من ١ : يقال في هذه الحالة أيضًا، أن الخام في حالة عدم اتزان، حيث إن قيمة اليورانيوم المقاس كيميائيًا، أقل من تلك المقاسة بأجهزة مطياف أشعة جاما، مما يعكس: إما فقد اليورانيوم بالإذابة، أو إضافة بعض وليدات اليورانيوم.

أما الطريقة الأخرى لتحديد ما إن كان الخام في حالة اتزان من عدمه، فإنها تعتمد على قياس نشاط كل من نظير اليورانيوم الأم ونظير الوليد. رغم أن هذه الطريقة مكلفة، إلا إنها تعتبر أدق من الطريقة الأولى. في حالة الأنظمة المغلقة (أي لا تسمح بهروب وليدات اليورانيوم)، فإنه يمكن قياس تركيز وليدات اليورانيوم، والثوريوم عن طريق قياس النظير الأم، والفترة التي كان فيها النظام مغلقًا. في حالة ما يكون النظام مغلقًا لفترة تزيد عن فترة نصف العمر للنظير الأم، فإن نشاط جميع وليدات النظير المشع، تساوي نشاط نظير الأم، تسمى هذه

الحالة بحالة الاتزان الإشعاعي(radioactive secular equilibrium). ولكن في الواقع، نتيجة التغيرات المستمرة التي تحدث على سطح الأرض، أو القريبة من السطح، فإنه يحدث دائمًا هجرة لهذه النظائر نتيجة ما تتعرض اليه من متغيرات فيزيائية وكيميائية. على سبيل المثال، يؤدي هروب الرادون، وهو أحد وليدات سلسلة اليورانيوم، من خلال الكسور والفواصل بالأرض وذوبانه في الماء، إلى حدوث نوع من عدم الاتزان الإشعاعي. هناك العديد من الأسباب لحدوث عدم الاتزان، ومنها عمليات الإذابة (leaching) من المواقع المشعة، الإذابة الاختيارية (selective solubility)، ورد فعل خروج جسيم ألفا (alpha recoil) في المحاليل المحيطة. أجري أوزموند وكيوارت (Osmond and Cowart, 1977) العديد من الدراسات على نشاطات النظائر المشعة في أنظمة المياه. في معظم الحالات، وجدا أن نسبة نشاط النظير يورانيوم^{٢٣٤}/يورانيوم^{٢٣٨} تزيد عن قيمة الوحدة وفي بعض الأحيان تزيد عن ١٠ في المياه الجوفية. كما تم تسجيل قيم أقل من الوحدة في المياه الجوفية، ولكنها غير شائعة.

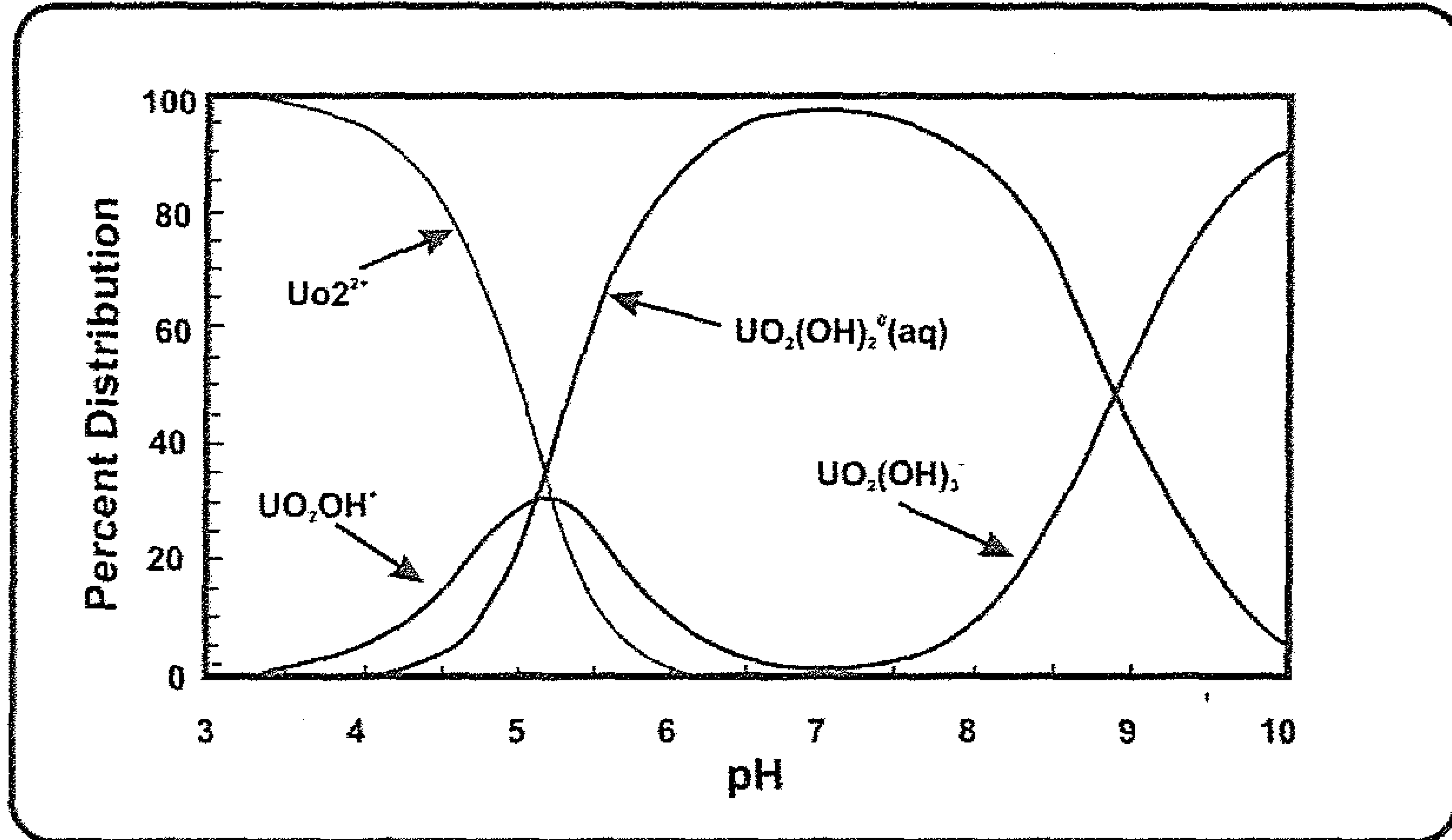
٥-٢- أصناف اليورانيوم في المياه الطبيعية
Uranium Speciation in Natural Water

يمكن أن يظهر اليورانيوم في البيئات المائية على أربع حالات مؤكسدة: يورانيوم ثلاثي (U^{3+})، ويورانيوم رباعي (U^{4+})، ويورانيوم خماسي (U^{5+})، ويورانيوم سداسي (U^{6+}). يعتبر كل من اليورانيوم الرباعي والسداسي أكثر الحالات شيوعًا، وذلك لأن اليورانيوم الثلاثي والخماسي يتأكسد بسهولة أثناء الذوبان في الماء، ليعطي يورانيوم رباعي ويورانيوم سداسي، على التوالي. يوجد اليورانيوم السداسي في البيئة المؤكسدة، بينما يوجد اليورانيوم الرباعي في البيئة الاختزالية.

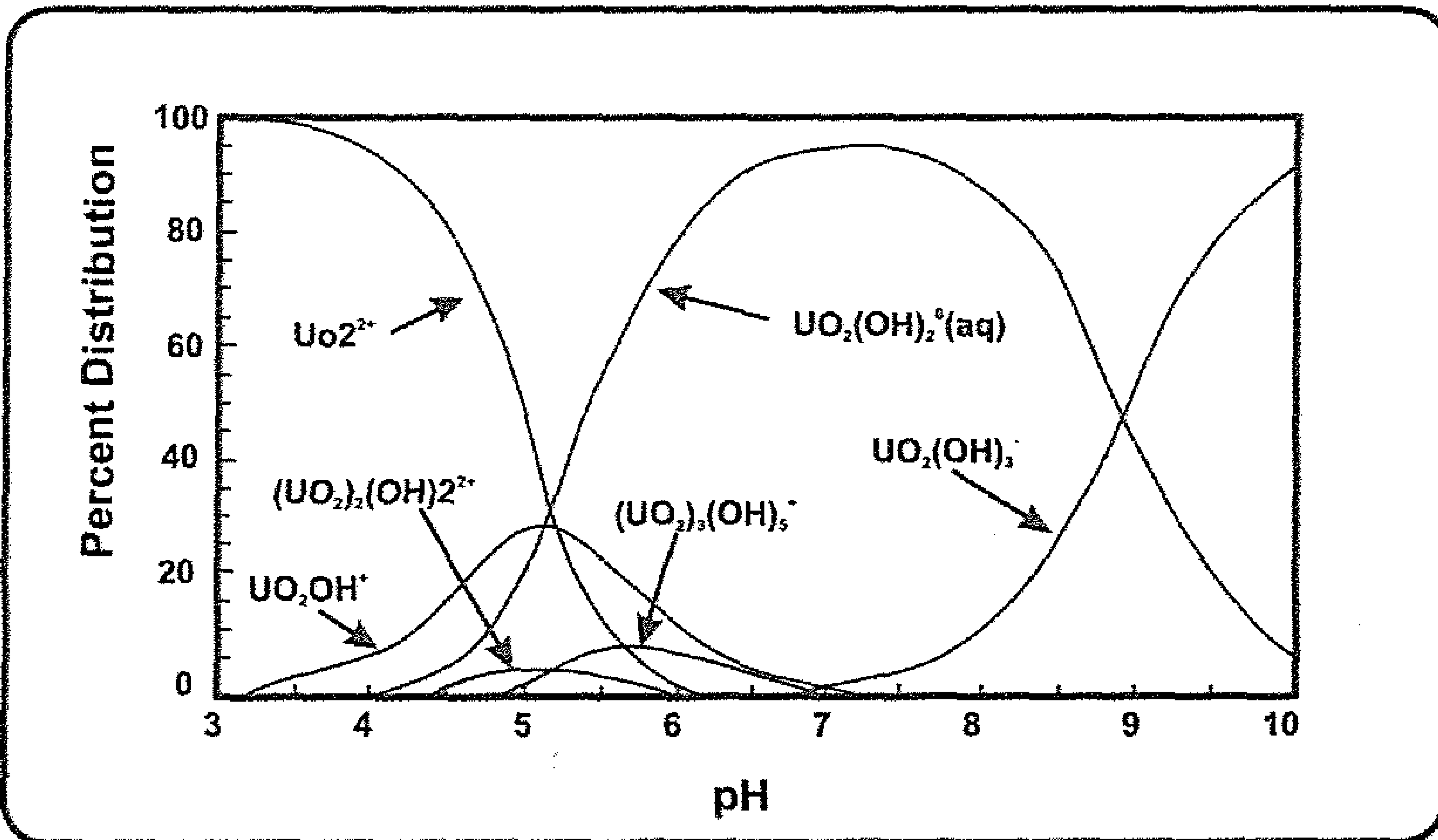
لقد قام لانجمير (Langmuir, 1978) بحساب أصناف اليورانيوم الرباعي في نظام يحتوي على ماء طبيعي به تركيزات من الكلوريد (١٠مجم/ لتر)، والفلوريد (٠,٢ مجم/لتر)، والفوسفات (٠,١ مجم/لتر)، والكبريتات (١٠٠مجم/ لتر). لقد وجد لانجمير أن اليورانيل (UO_2^{2+}) هو الأيون السائد عند درجة حامضية أقل من ٣، بينما تسود المعقدات المائية الحاوية على اليورانيوم الرباعي (هيدروكسيدات اليورانيوم $U(OH)_4$ and $U(OH)^{3+}$) عند درجة حامضية أكثر من ٣. ووجد أيضًا أن المعقدات الأخرى مثل الكلوريد، والفلوريد، والفوسفات، والكبريتات ليست ذات أهمية عند درجة حامضية أكثر من ٣.

لدرجة الحامضية (pH) تأثير كبير على عملية ادمصاص اليورانيوم السداسي بواسطة المواد الصلبة. يصاحب انخفاض درجة الحامضية انخفاضًا في عدد المواقع التبادلية على أسطح المواد ذات الشحنة المتغيرة، مثل أكاسيد الحديد والألومنيوم، والمواد العضوية الطبيعية. يمثل شكلا (٢-١٢ و٢-١٣) التوزيع المحسوب للمعقدات المائية لليورانيوم السداسي، نسبةً إلى درجة الحامضية، عند تركيزات مختلفة من اليورانيوم السداسي الذائب (٠,١ ميكروجرام/لتر، و١٠٠٠ ميكروجرام/لتر، على التوالي). تحت هذه الظروف، وجد لانجمير أن أيون اليورانيل، هو السائد عند درجة حامضية تساوي حوالي ٣، وعند درجة حامضية تساوي ٣,٥، فإن معقد هيدروكسيل اليورانيل [$(UO_2)OH^+$] يبدأ في التكّون، بينما يتكّون المعقد [$UO_2(OH)_2$] عند درجة حامضية تساوي ٤، ويصل أعلى نشاط له عند درجة حامضية تساوي ٧. عند هذه الدرجة من الحامضية، يبدأ معقد الهيدوكسيل [$UO_2(OH)_3$] في التكّون. يكمن الاختلاف بين الشكلين، نتيجة زيادة تركيز اليورانيوم في الشكل ٢-١٣، في تكون أيون الهيدوكسيل[$UO_2(OH)_2^{2+}$] عند درجة حامضية تتراوح بين ٤,٥

و ٦ وتكّون أيون الهيدوكسيل $[UO_2(OH)_5^+]$ عند درجة حامضية تتراوح بين ٤,٨ و ٧.

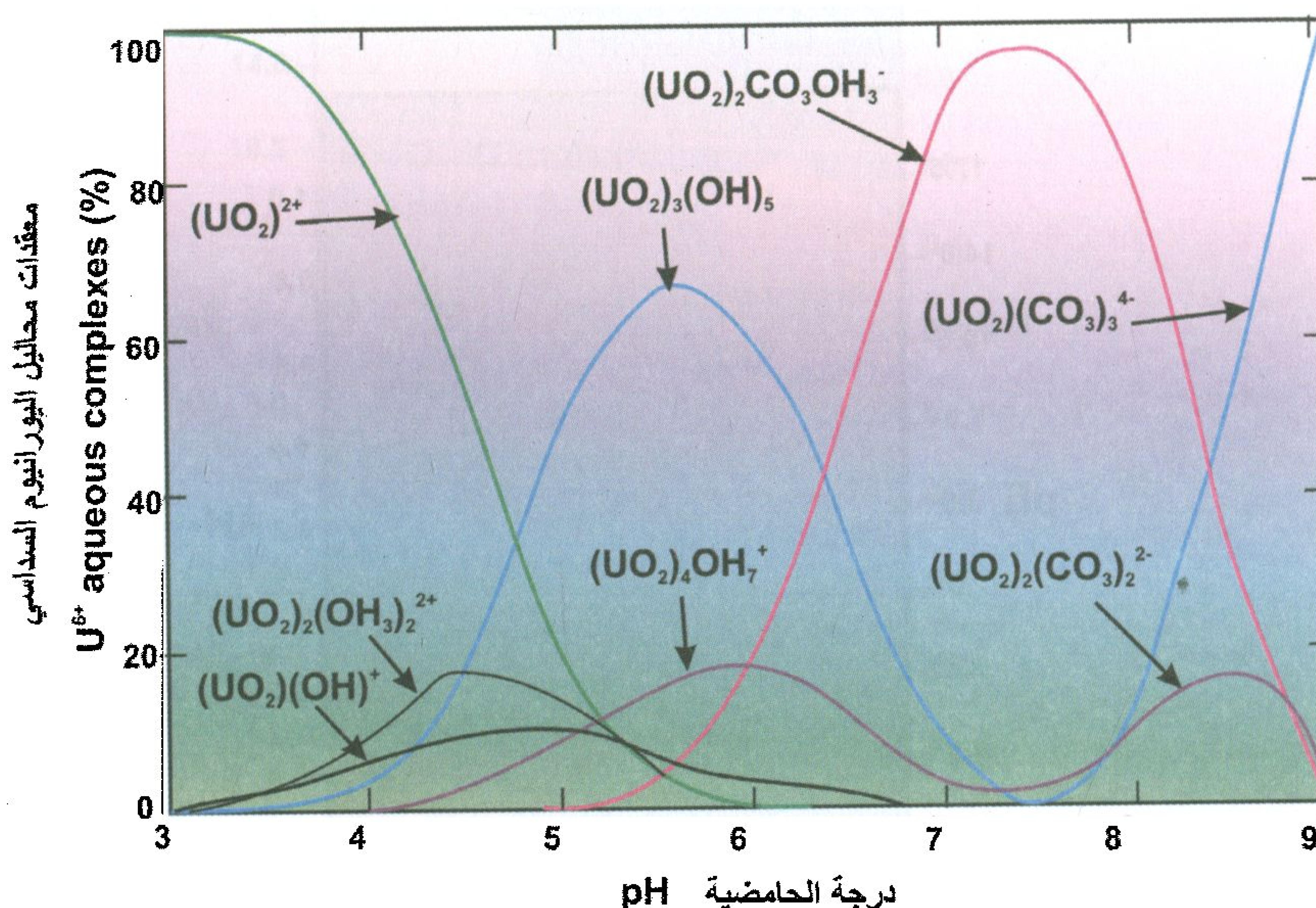


شكل ٢-١٢: التوزيع المحسوب لأصناف اليورانيوم السداسي U^{6+} المائية، وعلاقتها بدرجة الحامضية pH عند ٠,١ ميكروجرام/لتر لليورانيوم السداسي الكلي الذائب (Langmuir, 1978).



شكل ٢-١٣: التوزيع المحسوب لأصناف اليورانيوم السداسي U^{6+} المائية، وعلاقتها بدرجة الحامضية pH، عند ١٠٠٠ ميكروجرام/لتر لليورانيوم السداسي الكلي الذائب (Langmuir, 1978).

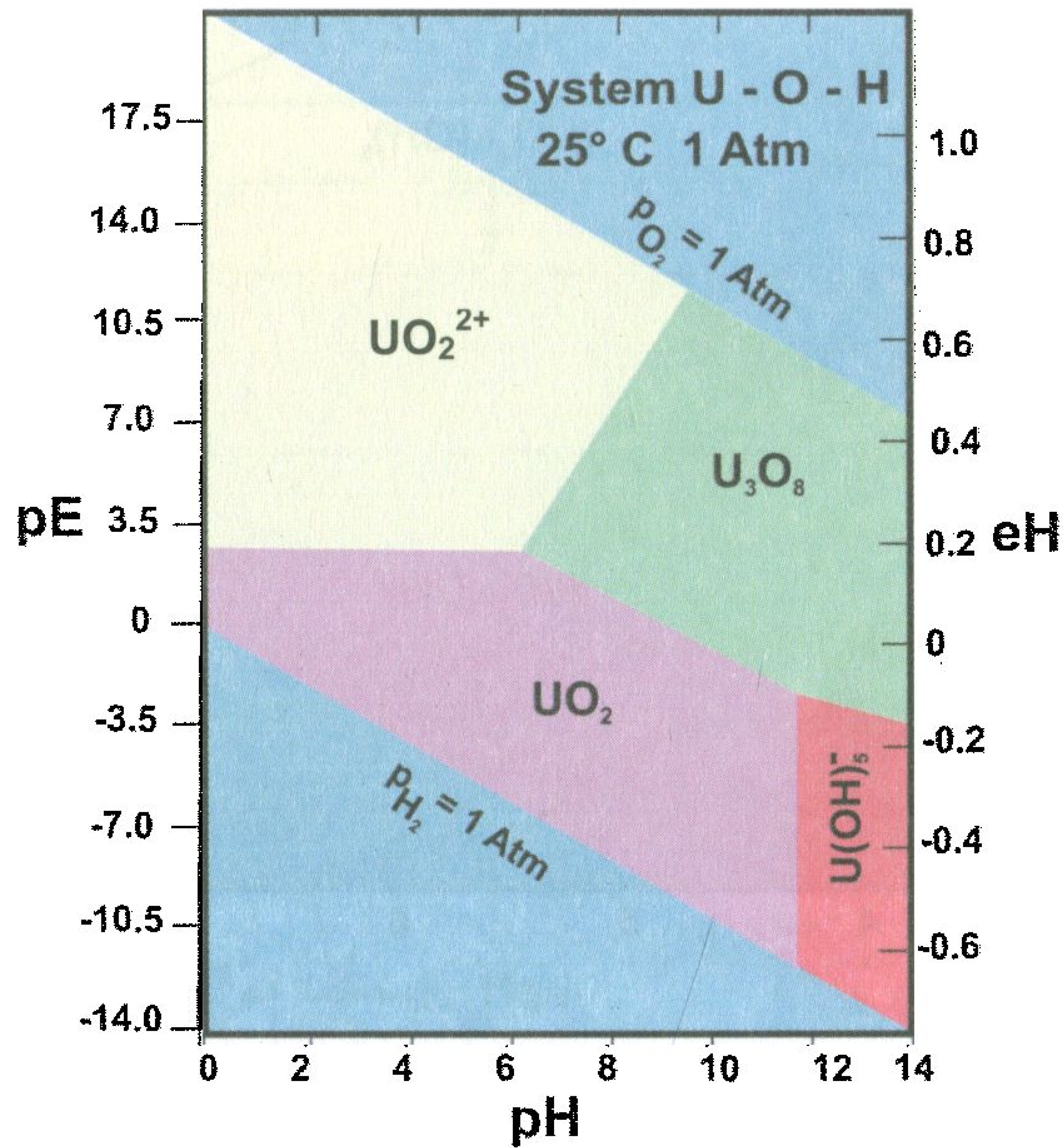
كما توصل سوزوكي وبانفيلد (Suzuki and Banfield, 1999) إلى مخطط آخر (شكل ٢-١٤)، يبين نسبة توزيع اليورانيوم المتزن عند ضغط جوي لثاني أكسيد الكربون (P_{co2}) يعادل ١٠^-٣,٥^. نلاحظ في هذا المخطط أن أيون اليورانيل (UO_2^{2+}) هو السائد عند درجة حامضية أقل من ٤,٥. بينما يسود أيون الهيدوكسيل [$UO_2(OH)_5^+$] عند قيمة درجة حامضية ٤,٨- ٦,٤. عند درجة حامضية أعلى من ٦,٤، فإن المحاليل تكون غنية بأنيونات كربونات هيدروكسيل اليورانيل، وكربونات اليورانيل. تعتمد درجة الحامضية على هذين المعقدين، وعلى تركيز اليورانيوم، وثاني أكسيد الكربون (شكل ٢-١٤).



شكل ٢-١٤: التوزيع المحسوب لمعقدات اليورانيوم السداسي المائية عند ٢٥ درجة مئوية وضغط جوى لثانى أكسيد الكربون يساوى ١٠^-٣,٥^ (Suzuki and Banfield, 1999).

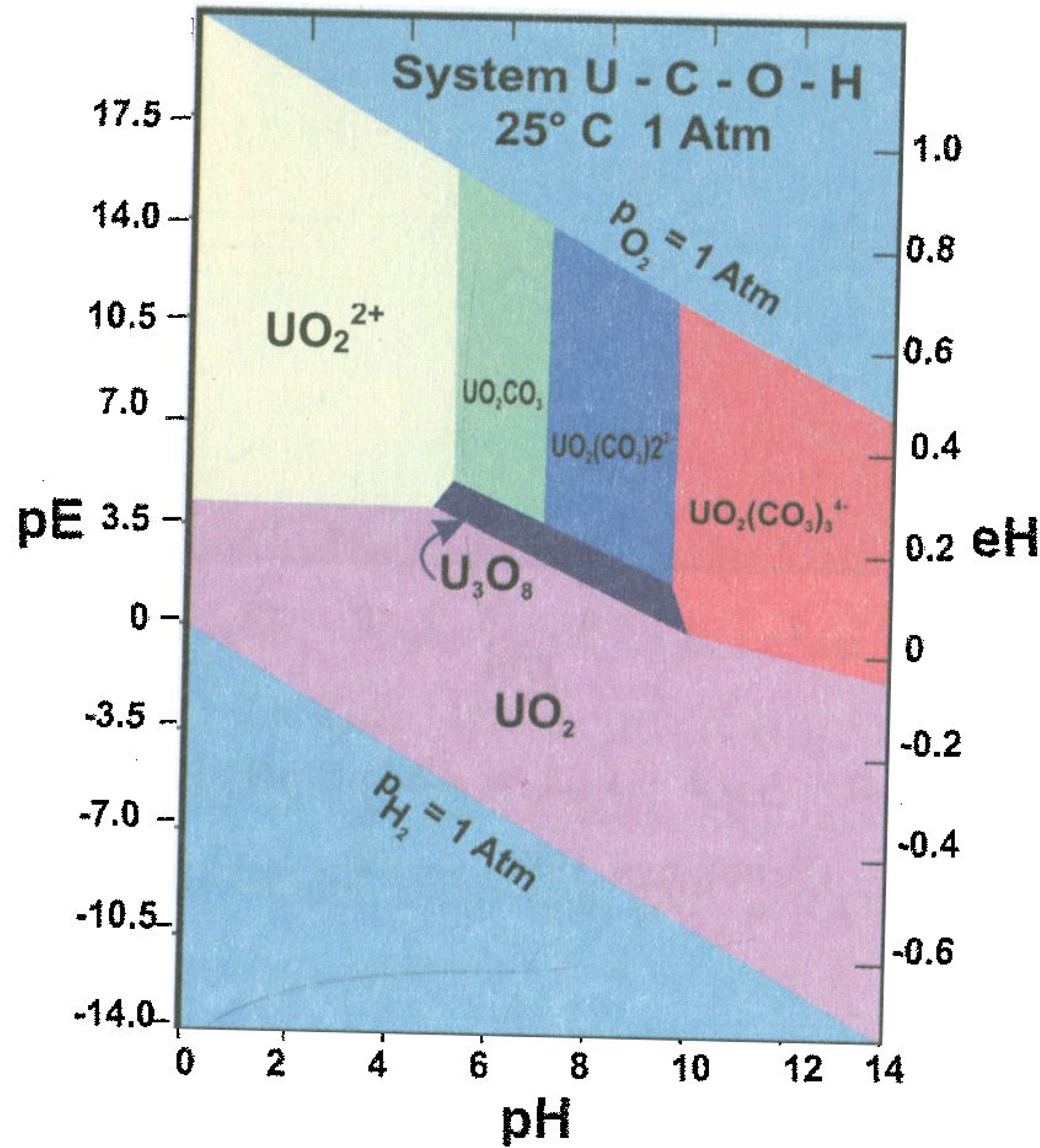
لقد قدم بروكينز (Brookins, 1988) مجموعة من المخططات التي يمكن عن طريقها فهم انتقال، أو هجرة، أصناف اليورانيوم المختلفة. تقوم هذه المخططات على قاعدة أساسية، وهي أن المعقدات ذات الشحنة يسهل إذابتها في

الماء، بينما المعقدات المتعادلة لا تذوب في الماء، وبالتالي فإن أصناف اليورانيوم ذات الشحنة سوف تذوب وتنتقل في اتجاه حركة المياه الجوفية. يمثل الشكل (٢-١٥) أبسط هذه المخططات (U-O-H)، حيث يحتوي على أربع مساحات فقط. يتضح من هذا الشكل، أن أيون اليورانيل (UO_2^{2+}) يمثل أهم صنف قابل للحركة (mobile form) عن أصناف اليورانيوم الأخرى. كما يحتوى الشكل على صنف أخر ذو شحنة، وهو أيون الهيدروكسيل [$U(OH)_5^-$]، ولكنه ليس بالأهمية كصنف من أصناف اليورانيوم القابلة للحركة، ويرجع ذلك إلى ندرة وجوده في الظروف البيئية المختلفة.



شكل ٢-١٥: مخطط pE/pH/eH لنظام يورانيوم-أكسجين-هيدروجين. تعني قيم pE المنخفضة ظروف اختزالية، بينما القيم المرتفعة تعني ظروف مؤكسدة. عند الحد الفاصل بين الأصناف، فإن المتفاعلات Reactants = النواتج Products، بينما يشغل الصنف المتأكسد الجزء الأعلى من الحد الفاصل، ويشغل الصنف المختزل أسفل الحد الفاصل (Brookins, 1988).

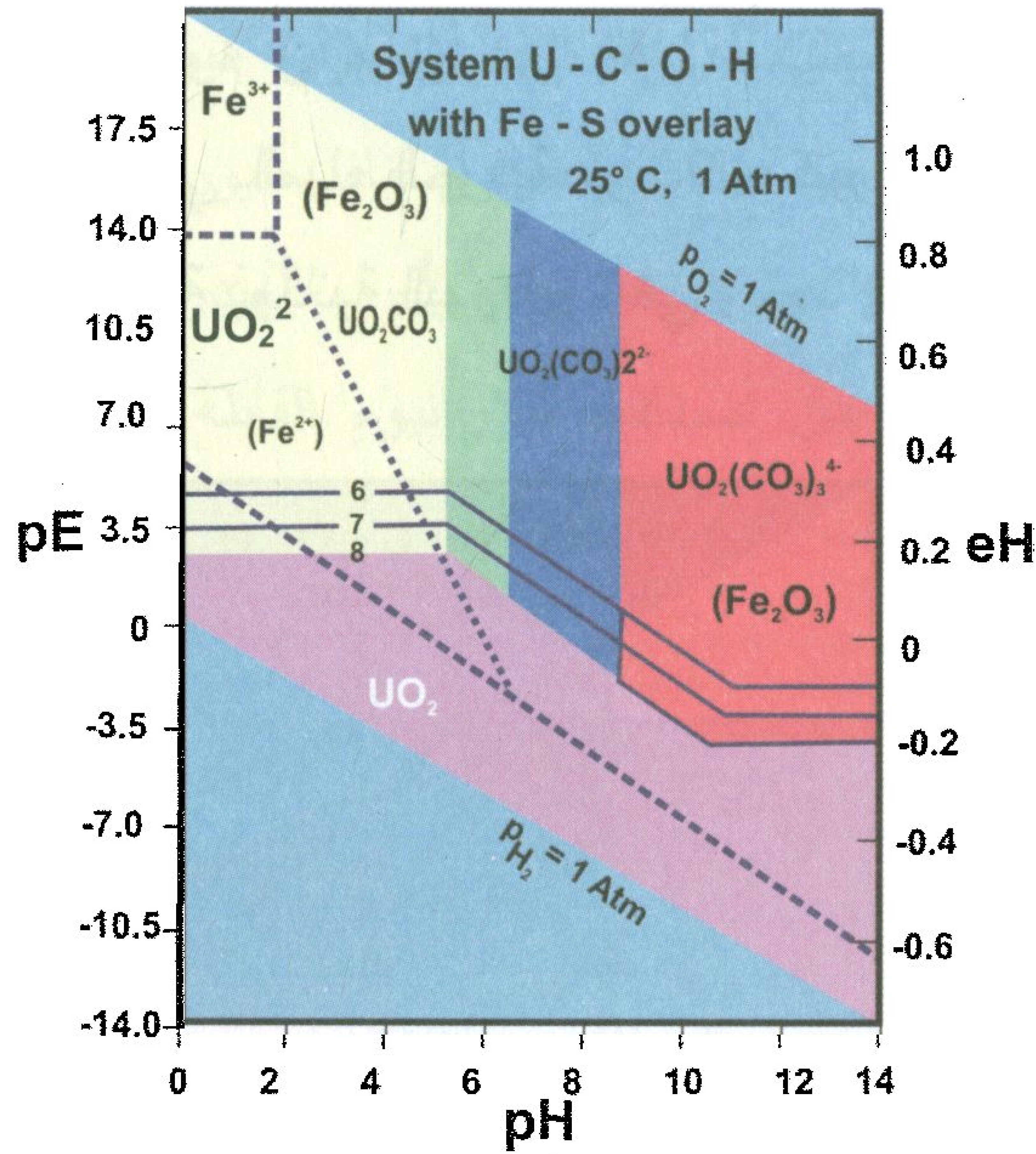
بإضافة الكربون إلى النظام U-O-H (Brookins, 1988)، فإنه يحدث تغيير في المخطط pE/pH/eH، كما هو واضح من الشكل (٢-١٦). يشكل اليورانيوم ثلاثة أنواع من معقدات الكربونات، اثنان قابلان للإذابة ويشغلان المساحة التي كان يشغلها أكسيد اليورانيوم (U_3O_8) غير القابل للإذابة في شكل (٢-١٥). سيؤثر وجود الكربونات في المياه الجوفية، وبشكل كبير، على سلوك وانتقال اليورانيوم، حيث تزيد درجة ذوبانية اليورانيوم في وجود الكربونات.



شكل ٢-١٦: مخطط pE/pH/eH لنظام يورانيوم – كربون – أكسجين – هيدروجين (Brookings, 1988).

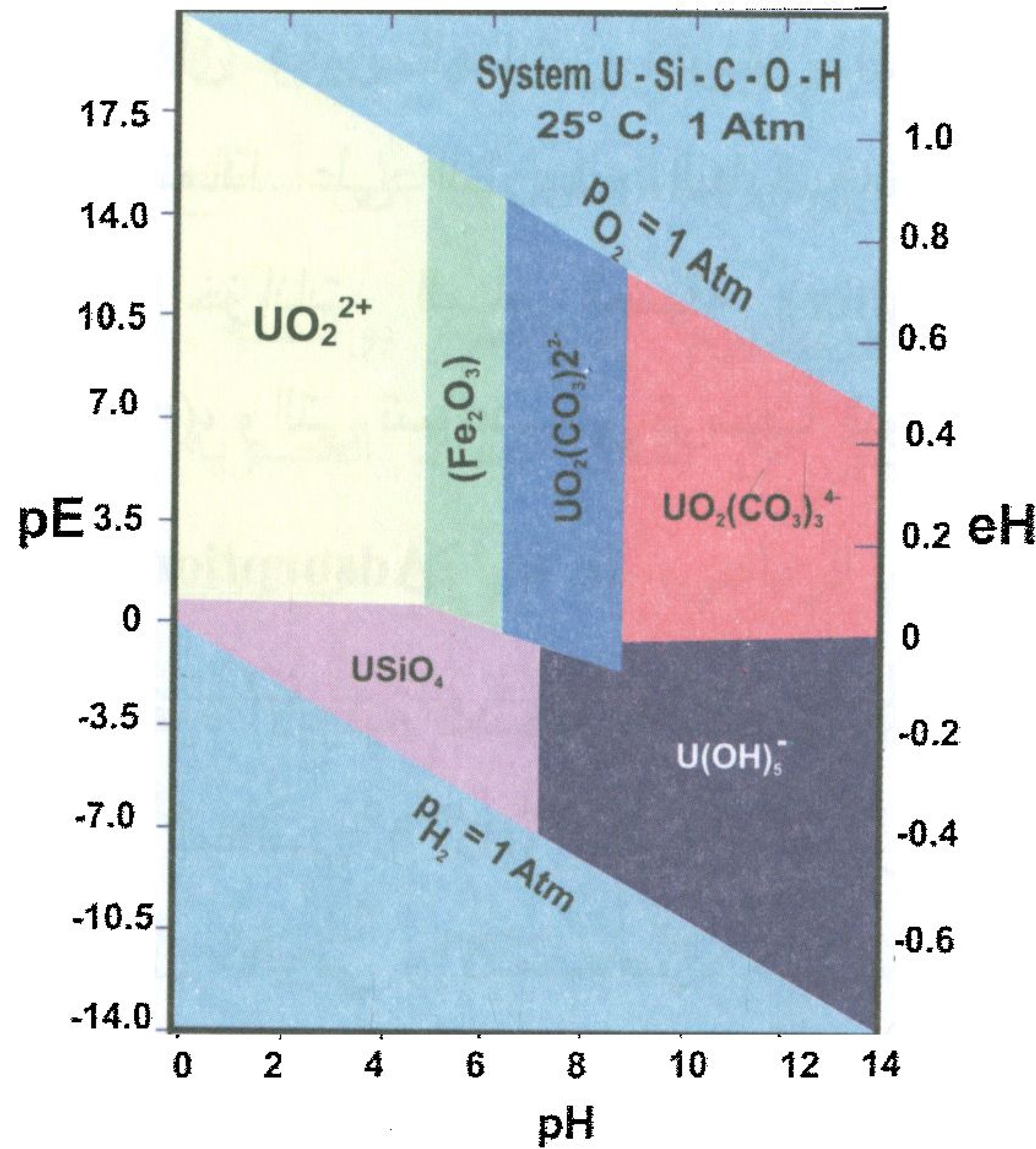
بإضافة الحديد والكبريت إلى النظام في الشكل السابق والمكّون من يورانيوم–كربون–أكسيجين–هيدروجين U-C-O-H، ينشأ مخطط مختلف، كما هو واضح من الشكل (٢-١٧). يستخدم هذا المخطط بواسطة الجيوكيميائيين

لمعرفة التفاعلات الممكنة لتكوين البيتشبلند، وأيضًا في تفسير تواجدات خام اليورانيوم.



شكل ٢-١٧: مخطط pE/pH/eH لنظام يورانيوم – كربون – أكسجين – هيدروجين مع إشتراك الحديد والكبريت (Brookings, 1988).

مع إضافة السيليكون، يصبح النظام مكونًا من يورانيوم–سيليكون–كربون–أكسجين–هيدروجين، كما هو واضح في شكل (٢-١٨). يؤدي إضافة السيليكون إلى حدوث تغيرات جوهرية. نجد أن المساحات التي كان يشغلها أيونا أكسيد اليورانيوم (U_3O_8 و UO_2) بشكل (٢-١٦) قد اختفت تمامًا وحل محلها سيليكات اليورانيوم ($USiO_4$)، وأيون الهيدروكسيل [$U(OH)_5^-$]. النقطة الهامة في هذا المخطط، أن أيون الهيدروكسيل قابلاً للإذابة، ويمكن أن يتواجد تحت ظروف مناسبة للمياه الجوفية.



شكل ٢-١٨: مخطط pE/pH/eH لنظام يورانيوم-سيليكون-كربون-أكسجين-هيدروجين عند ٢٥ درجة مئوية، وقيمة ١ ضغط جوي. يعتبر المعقد الكربوناتي $[UO_2(CO_3)_2]^{2-}$ هو الأكثر أهمية عند درجة حامضية حوالي ٨، بينما عند درجة حامضية أعلى من ٨، فإن المعقد الكربوناتي $[UO_2(CO_3)_3]^4$ هو الأكثر أهمية (Brookings, 1988).

٥-٣- ادمصاص اليورانيوم وترسبه
Uranium Adsorption and Precipitation

تتأثر حركية اليورانيوم في المياه الطبيعية بعدة عوامل، أهمها: ادمصاص أيونات اليورانيوم، أو ترسبها (precipitation)، أو انحلال (dissolution) المعادن الحاوية على اليورانيوم. تلعب عمليات الانحلال والترسيب دورًا هامًا في تركيز اليورانيوم الرباعي (U^{4+})، عن تركيز اليورانيوم السداسي (U^{6+}) في المياه الجوفية. في معظم الحالات، فإن هاتين العمليتين لا تقومان بدور في تركيز اليورانيوم السداسي (U^{6+}) في المياه الجوفية المؤكسدة، والتي تبعد عن

مصدر اليورانيوم. على الجانب الآخر، قريبًا من مصدر اليورانيوم أو في البيئات الاختزالية، نجد أن هاتين العمليتين تكونان ذاتا أهمية، حيث يترسب العديد من المكونات اعتمادًا على الظروف البيئية (Frondel, 1958). توجد البيئات الاختزالية في خزانات المياه العميقة (deep aquifer)، ومناطق المستنقعات (marsh areas)، والتي تساعد على ترسيب اليورانيوم الرباعي.

٥-٣-١- الادمصاص Adsorption

في المحاليل ذات القوة الأيونية المنخفضة (low ionic strength)، وتركيز منخفض من اليورانيوم السداسي (U^{6+})، نجد أن تركيزات اليورانيوم المذاب يتحكم فيها عمليات التبادل الأيوني والادمصاص. على سبيل المثال، ادمصاص أيون اليورانيل بواسطة المعادن الطينية (Chisholm-Brause *et al.*, 1994، Abd El-Naby, 2008) والمواد العضوية (Read *et al.*, 1993)، والأكاسيد (Waite *et al.*, 1994). مع زيادة القوة الأيونية للمحلول، فإن أيونات أخرى مثل الكالسيوم (Ca^{2+})، والماغنسيوم (Mg^{2+})، والبوتاسيوم (K^{+}) سوف تحل محل أيون اليورانيوم بالمواقع التبادلية، وتدفعه لأن يكون في المحلول. يفسر ذلك القابلية العالية لأيون اليورانيل للحركة في المحاليل ذات القوة الأيونية العالية. بشكل عام، هناك عدة عمليات تتحكم في عملية ادمصاص اليورانيوم:

١) ادمصاص اليورانيوم بواسطة أكاسيد الحديد والمنجينز، حيث تمثل هذه العملية أكثر العمليات أهمية في استخلاص اليورانيوم من المحلول (Waite *et al.*, 1994). يمثل الهيماتيت والجوتيت أكثر المكونات المالئة للكسور في الطبيعة، والتي تعمل على استقطاب اليورانيوم، إما بالادمصاص، أو بالترسيب المصاحب (co-precipitation). لقد أثبت كاساس وآخرون (Casas *et al.*, 1994) معمليًا أن الهيماتيت يلعب دورًا هامًا في استبقاء اليورانيوم الذي يوجد بتركيز

منخفض كمالئ للكسور (Fracture filling) (٠,٣٤٪ من القيمة الوزنية). كما دلت الدراسات المعملية بواسطة برونو وآخرون (Bruno *et al.*, 1995)، أنه يمكن ترسيب معدن الشوبيت (Schoepite) على أسطح أكاسيد الحديد الثلاثية.

٢) ادمصاص اليورانيوم السداسي بواسطة المواد العضوية بالتربة والرسوبيات. من الممكن أن تعمل المواد العضوية على اختزال اليورانيوم السداسي إلى اليورانيوم الرباعي. لقد قام كل من روزينج وفراي (Rosing and Frei, 2004) بدراسة الطفلة المتحولة بغرب جرينلاند (West Greenland). في هذه الدراسة، تم استنتاج أن هذه الطفلة تحتوي على ما يزيد عن ٠,٤٪ كربون مختزل. دلت الدراسات النظائرية أن مصدر الكربون هو بعض الكائنات الهائمة (planktonic organisms). كما دلت دراسة نظير الرصاص على أن هذه الطفلة تحتوي على نسبة عالية من اليورانيوم/الثوريوم. يدل ذلك على أن المواد العضوية بالطفلة أحدثت نوعًا من البيئة الاختزالية المحلية، والتي عملت على ترسيب اليورانيوم المنتقل بواسطة مياه المحيط المؤكسدة في موقع ترسيب الطفلة. تحدث عملية ادمصاص اليورانيوم بواسطة المواد الدبالية (humic substance)، من خلال عملية تبادل أيوني سريع، وعمليات تكوّن معقدات مع مجموعات كربوناتية، ومجاميع حامضية أخرى.

٣) ادمصاص اليورانيوم بواسطة المعادن الطينية، يرجع ذلك إلى ما تتمتع به المعادن الطينية من مساحة سطح كبيرة جدًا، وأيضًا إلى الانتشار الواسع لهذه المعادن في البيئات السطحية الطبيعية. تحتوى هذه المعادن على شحنات بأسطحها، مما يزيد قدرتها على التبادل الأيوني، ومن ثم ادمصاص العناصر، بما فيها اليورانيوم، من المحاليل (انظر شكلا ٢-٩ و ٢-١٠). لقد ثبت شيوع عملية ادمصاص اليورانيوم بواسطة معادن السميكتيت في غياب

الكربونات. ولكن في حالة وجود الكربونات أو المواد العضوية، فإنه يقـل دور المعادن الطينية في الادمصاص (Hsi and Langmuir, 1985). لقـد اهتمـت دراسات عديدة بدراسة التفاعل بين المعادن الطينية، وكل من العناصر الأرضية النادرة واليورانيوم. يعتمد هذا التفاعل على عدة عوامـل، منهـا دخـول تلـك العناصر بالبنية البلورية للمعادن الطينية، وقـدرة التبـادل الأيـوني، وطبيعـة الكاتيونات بين الطبقية (interlayer cations)، وتأثير درجة الحامـضية (pH)، وتكّون معقدات عن طريق الأحماض الدبالية. لقد ذكر كوبين وآخرون (Coppin *et al.*, 2002) أن عملية ادمصاص اليورانيوم على سطح المعادن الطينية، مثـل الكاولينيت والمونتموريللونيت الصودي، لا تعتمد على المذيب، أو على وجـود ثاني أكسيد الكربون في صورة ذائبة، ولكن تعتمد على طبيعة المعادن الطينية، ودرجة الحامضية، والقوى الأيونية.

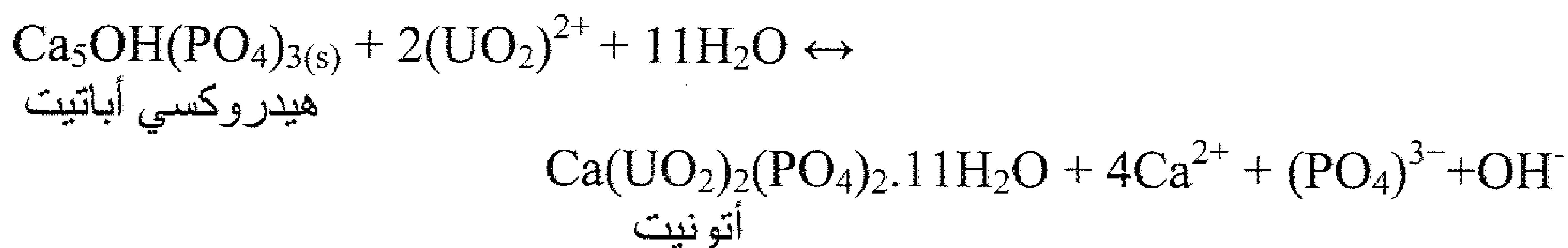
٥-٣-٢- ترسيب اليورانيوم في الرواسب البحرية

Uranium Precipitation in Marine Deposits

هناك طرق عديدة تؤدي إلى ترسيب اليورانيوم من مياه البحر، حيث تلعب قدرة اليورانيوم على تكوين معقدات ثابتة مع الأصناف المختلفة دورًا هامًا في هذه العمليات. بشكل عام، لوحظ أن تركيز اليورانيوم في الصخور الرسوبية منخفض (٢ جزء في المليون ppm)، ويرجع ذلك إلى سلوك اليورانيوم في المحاليل المائية الغنية بالكربونات، حيث يميل اليورانيوم إلى البقاء في المحلول. يحتاج اليورانيوم في هذه الحالة إلى ظروف اختزالية، كي يترسب من المحاليل الغنية بالكربونات (Dongarra, 1984). لقد تم دراسة نظائر اليورانيوم، والثوريوم بصخور الكربونات البحرية الحديثة بواسطة روبينسون وآخرون (Robinson *et al.*, 2004). تساهم هذه الدراسات بشكل كبير في تحديد أعمار

هذه الصخور، باستخدام نظائر اليورانيوم والثوريوم. دلت هذه الدراسة على أن محتوى اليورانيوم في رواسب الكربونات، تعتمد على عوامل بيولوجية، أكثر من عملية ترسيب كيميائية فقط.

يترسب أيضًا اليورانيوم في صخور الفوسفات المترسبة في بيئة بحرية. في هذه الحالة، فإنه يعتقد أن اليورانيوم (في صورة أيون اليورانيل) حل محل الكالسيوم، بالبنية البلورية لمعدن الأباتيت (apatite)، أو أن اليورانيوم تم ادمصاصه على سطح بلورات الأباتيت (Abd El Naby and Dawood, 2008). قد يحدث في النهاية نوع من التحول لمعدن الأباتيت، ليعطي معدن الأتونيت، كما هو واضح من المعادلة التالية:



$$Ca_5OH(PO_4)_{3(s)} + 2(UO_2)^{2+} + 11H_2O \leftrightarrow$$
هيدروكسي أباتيت

$$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2.11H_2O + 4Ca^{2+} + (PO_4)^{3-} + OH^-$$
أتونيت

تعتبر صخور الفوسفات من أهم أنواع الصخور الرسوبية البحرية في استخلاص اليورانيوم من مياه البحر، والمياه الجوفية (Dabous, 2003). كما تلعب الطفلة السوداء البحرية، دورًا هامًا في استخلاص كميات عالية من اليورانيوم، حيث تتكون هذه الصخور من معادن طينية، ويعتبر الإليت (illite) أكثرها انتشارًا. تم ترسيب هذه الصخور ببطء في وجود مواد عضوية، مع إسهام ضئيل جدًا من الرواسب الفتاتية. تحت هذه الظروف، تكون المياه العميقة فقيرة في الأكسجين وغنيه بكبريتيد الهيدروجين الذي ينتج عن اختزال الكبريتات. لقد ثبت أن هناك علاقة مباشرة بين تركيز اليورانيوم في صخور الطفلة السوداء البحرية، ومستوى الكربون العضوي (organic carbon) (Rosing and Frei, 2004).

٥-٤- دور البكتريا في تكّون تمعدنات اليورانيوم

Microbial Role in the Formation of Uranium Mineralization

تؤثر الكائنات الحية الدقيقة على توزيع رواسب اليورانيوم سواء كانت كمحفزات (catalysers) لتفاعلات الاختزال، أو بتأثيرات أخرى غير مباشرة. تلعب الكائنات الحية الدقيقة دورًا هامًا في تكوين أهم راسبين لليورانيوم في العالم، هما رواسب كونجلميرات حبيبات الكوارتز (quartz-pebble conglomerate)، ورواسب الحجر الرملي. يوجد اليورانيوم في كلا الراسبين في صورته الرباعية (U^{4+}). يرجع تكون رواسب كونجلميرات حبيبات الكوارتز إلى ترسب الفتات المنقول مصاحبًا معه ترسيب اليورانينيت تحت ظروف نقص الأكسجين (anoxic condition). يتكون خام اليورانيوم في الطبقات الغنية بالمواد العضوية مثل الكيروجين (kerogen) (Willingham *et al.,* 1985). يعتقد هؤلاء الباحثون أن الطبقات الغنية بالكيروجين نتجت عن نوع من البكتريا تسمى سيانوبكتيريا (Cyanobacteria).

تعتبر رواسب الحجر الرملي من أكثر خزانات اليورانيوم الشائعة، والتي تتكون عند درجة حرارة أقل من ٥٠ درجة مئوية، عن طريق اختزال اليورانيوم السداسي (U^{6+}) إلى يورانيوم رباعي (U^{4+}). غالبًا ما يكون مصدر اليورانيوم في هذه الرواسب من الجرانيت، أو صخور الطف Tuff. لقد تم تفسير نشأة رواسب اليورانيوم في هذا النوع، على أنها نواتج انتقال اليورانيوم في محاليل متعادلة، إلى قلوية مؤكسدة، ويؤدي اختزالها إلى ترسيب معادن اليورانينيت، والكوفينيت (Langmuir, 1997). تلعب الكائنات الحية الدقيقة دورًا كبيرًا في اختزال اليورانيوم السداسي إلى الرباعي (Lovely *et al.,* 1993). يعتمد استخلاص اليورانيوم بواسطة الكائنات الحية الدقيقة على عدة عوامل،

منها درجة الحامضية (pH)، وزمن تفاعل المحاليل مع الصخور (contact time)، وتركيز اليورانيوم في المحلول، وأيضًا على نوعية الكاتيونات، والأنيونات الموجودة، وعلى الحالة الفسيولوجية لخلايا الكائنات الحية الدقيقة.

الباب الثالث

معادن اليورانيوم

- مقدمة
- مجموعة معادن أكاسيد اليورانيوم
- مجموعة معادن سيليكات اليورانيوم
- مجموعة معادن فانيدات اليورانيوم
- مجموعة معادن فوسفات اليورانيوم
- مجموعة معادن زرنيخات اليورانيوم
- مجموعة معادن كربونات اليورانيوم
- مجموعة معادن كبريتات اليورانيوم
- مجموعة معادن موليبدات وتنجستات وتيلوريدات اليورانيوم
- مجموعة معادن سالينيدات اليورانيوم
- مجموعة معادن نيوبات، تانتالات وتيتانات اليورانيوم
- معقدات اليورانيوم العضوية



١- مقدمة

يمكن تصنيف معادن اليورانيوم إلى نوعين أساسيين إعتمادًا على درجة التأكسد ونشأة المعدن، يعرف النوع الأول بالمعادن الأولية، والثاني بالمعادن الثانوية، والتي تنشأ من تغاير وتحلل المعادن الأولية. يعتبر كل من اليورانينيت (أكسيد اليورانيوم)، والكوفينيت (سيليكات اليورانيوم)، من أهم معادن اليورانيوم الأولية. تتكون المعادن الثانوية من خلال عناصر وأيونات مشتقة من المعادن الأولية خلال عمليات الأكسدة، أو من المحاليل الجوفية المهاجرة تحت ظروف فيزيوكيميائية معينة. تختلف المعادن الثانوية عن الأولية في وجودها على شكل مجموعات معدنية مختلفة، وليست معدنًا واحدًا. يحدث التغاير من المعدن الأولي إلى الثانوي، من خلال عمليات متدرجة ومعقدة إلى حدٍ ما. ترجع عمليات الأكسدة، إلى تأثير المياه الجوفية المهاجرة، أو تعرّض المعدن إلى الغلاف الجوي، وأيضًا إلى الطبوغرافية والظروف المناخية.

غالبًا ما تكون المعادن الأولية سوداء اللون، أو بنية غامقة، وذات وزن نوعي عالٍ، وبريق لامع. على عكس ذلك، نجد أن هذه المعادن تتغاير إلى معادن ثانوية ذات ألوان فاتحة جذابة، عند تعرضها للتجوية بالقرب من سطح الأرض. توجد المعادن الأولية عادةً على شكل عروق، أو في البيجماتيت، رغم اكتشاف العديد من رواسب اليورانيوم بالصخور الرسوبية في الآونة الأخيرة. كما توجد معادن اليورانيوم الأولية في رواسب المراقد (placer deposits). ومن معادن اليورانيوم الأولية، غير اليورانينيت والكوفينيت، مجموعة الأكاسيد المتعددة لليورانيوم، والتي تحتوي على نيوبيوم، وتانتالوم، وتيتانيوم. توجد معظم هذه المعادن في رواسب المراقد أو صخور البيجماتيت بكميات قليلة نسبياً. تتمثل هذه المجموعة في معادن الديفيديت (davidite)، والبرانيريت

(brannerite)، والبيتافيت (betafite)، والأيوكزينيت (euxenite)، والفيرجوزونيت (fergusonite)، والبيروكلور (pyrochlore)، والسامرسكيت (samarskite). تحتوي معظم هذه المعادن على نسبة بسيطة من اليورانيوم، مما يجعل تكاليف إنتاج اليورانيوم منها عالية، ويرجع ذلك إلى صعوبة معالجتها كيميائياً (refractory minerals)، ولكن قد يتم إنتاج اليورانيوم من هذه المعادن كمنتج جانبي (by-product) لعناصر هامة أخرى مثل النيوبيوم، والتانتالوم، والتيتانيوم.

بشكل عام، تتميز معادن اليورانيوم الثانوية بالشكل، واللون، والنسيج الجذاب، مثل اللون الأصفر الوهاج، والبرتقالي، والأخضر، ومعظم ألوان الطيف الأخرى. يتميز بعضًا منها أيضًا بخاصية التفلر (fluorescence) عند تعرضه للضوء فوق البنفسجي. على عكس المعادن الأولية، والتي توجد على شكل كتلي، ووزن نوعي عالي، نجد أن المعادن الثانوية تتميز بوزن نوعي منخفض، وتوجد على شكل مواد ترابية، أو بودرة دقيقة في الحجم، أو على شكل إبري (needle)، أو صفائحي، أو قشور. رغم ألوانها الجذابة، إلا أن العاملين بمجال استكشاف خامات اليورانيوم، قد يختلط عليهم الأمر في التعرف على هذه المعادن في الحقل، اعتمادًا على لونها، ويرجع ذلك إلى تشابه ألوان المعادن الثانوية مع معادن أخرى، مثل: معدن الملاكيت (كربونات النحاس)، والذي يتميز باللون الأخضر، ومعدن الليمونيت (هيدروكسيد الحديد)، والذي يتميز بلونه الأصفر، وأيضًا معدن الكبريت.

تشارك معادن اليورانيوم الثانوية بنسبة ضئيلة في الإنتاج العالمي لليورانيوم، رغم انتشارها الواسع بالنسبة إلى معادن اليورانيوم الأولية. ولكن مع تقدم تقنيات استخلاص اليورانيوم، والحاجة لإنتاج مزيد من اليورانيوم، بدأ الاهتمام بالمعادن الثانوية. تتكون معادن اليورانيوم الثانوية بطريقتين:

(١) تحلل معادن اليورانيوم الأولية بموضعها الأصلي، عن طريق عمليات التجوية والأكسدة.

(٢) الترسيب من محاليل غنية باليورانيوم. قد تحمل هذه المحاليل اليورانيوم إلى مسافات بعيدة عن المصدر الأصلي، مثل: رواسب الحجر الرملي، والكنجلميرات، والطفلة، والحجر الجيري.

توجد المعادن الثانوية على شكل مجاميع من معادن الفوسفات، والسيليكات، والكربونات، والكبريتات، والهيدروكسيدات. وتنتشر هذه المعادن بالمناطق الجافة، وشبه الجافة، مثل مناطق الدرع العربي النوبي، والجزء الغربي والجنوب الغربي للولايات المتحدة الأمريكية، وجنوب روسيا. قد تستخدم المعادن الثانوية كمرشد أساسي في الوصول إلى تواجدات معادن اليورانيوم الأولية، التي قد تُشتق منها، والتي قد توجد على عمق في نطاق الاختزال. من أكثر معادن اليورانيوم الثانوية شيوعاً: اليورانوفان (uranophane)، والكرنوتيت (Carnotite)، والتيامونيت (tyuamunite)، والتوربيرنيت (torbernite)، والميتا–توربيرنيت (meta-torbernite)، والأوتونيت (autunite)، والميتا–أوتونيت (meta-autunite)، والشروكينجريت (schroekingerite)، والزيونيريت (zeunerite).

٢– تصنيف معادن اليورانيوم

تصنف معادن اليورانيوم بناءً على التركيب الكيميائي إلى ١٢ مجموعة:

١) مجموعة معادن أكاسيد اليورانيوم.

٢) مجموعة معادن سيليكات اليورانيوم.

٣) مجموعة معادن فانيدات اليورانيوم.

٤) مجموعة معادن فوسفات اليورانيوم.

٥) مجموعة معادن زرنيخات اليورانيوم.
٦) مجموعة معادن كربونات اليورانيوم.
٧) مجموعة معادن كبريتات اليورانيوم.
٨) مجموعة معادن موليبدات، وتنجستات، وتيلوريدات اليورانيوم.
٩) مجموعة معادن سالينيدات اليورانيوم.
١٠) مجموعة معادن نيوبات، تانتالات، وتيتانات اليورانيوم.
١١) معقدات اليورانيوم العضوية.

سنستعرض فيما يلي الخصائص العامة لكل مجموعة، وخصائص بعض معادنها الأكثر شيوعاً، مثل الهيئة البلورية، والنسيج، والصفات الفيزيائية، مثل: اللون، والبريق، والانفصام، والصلادة، والوزن النوعي، بالإضافة إلى الصحبة المعدنية، وأشهر أماكن تواجد المعدن، وأصل تسميته.

٣- مجموعة معادن أكاسيد اليورانيوم

Uranium Oxides

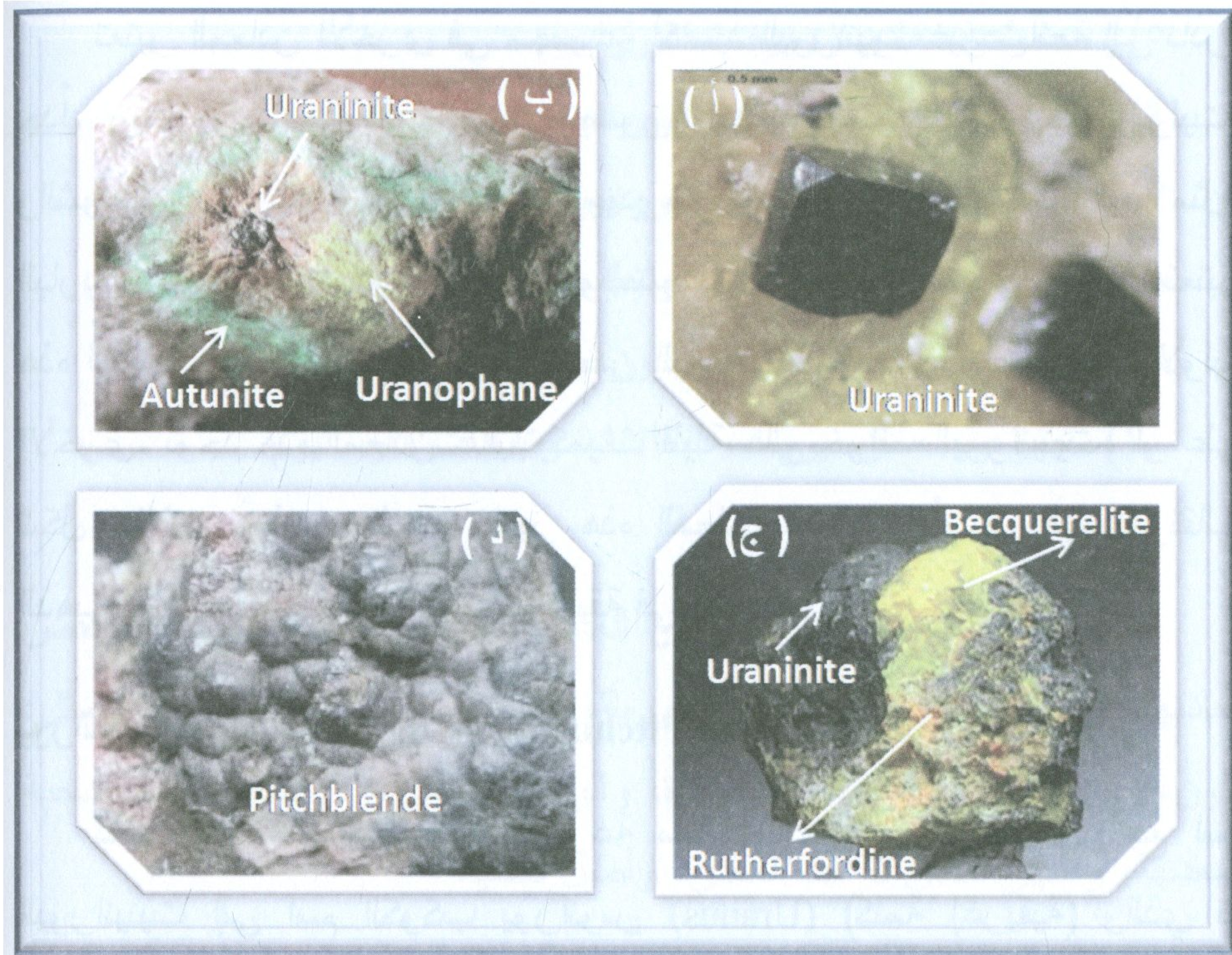
يعتبر معدني اليورانينيت والبيتشبلند أهم معادن هذه المجموعة، والتي تمثل المصدر الأساسي لمعظم اليورانيوم الذائب في محاليل المياه الجوفية، من جراء عمليات التغاير (alteration). توجد معادن أكاسيد اليورانيوم بصخور البيجماتيت، والجرانيت فوق الألومنيومي، وأيضًا في العروق، والرواسب الطبقية. يتميز اليورانينيت بنشاطه الإشعاعي العالي، ويعتبر من أثقل المعادن، وهو في حالته النقية. بشكل عام، يتعرض اليورانينيت إلى عمليات أكسدة بدرجة أقل في صخور البيجماتيت، وتزيد هذه الدرجة بالعروق، وتصل إلى أقصاها بصخور الحجر الرملي الطبقي. يعتبر معدني البروجيريت، والسيلفيت أنواعًا من اليورانينيت غنية بالعناصر الأرضية النادرة.

تعتبر المعادن الأخرى في مجموعة أكاسيد اليورانيوم غير شائعة إلى نادرة جداً. ربما توجد هذه المعادن في صورة أكاسيد مهدرجة مثل البيكويرليت، والشوبيت، أو على شكل أكاسيد مهدرجة يصاحبها عناصر أخرى، مثل: الباريوم، والبيزموث، والرصاص، والصوديوم، والبوتاسيوم، والنحاس. تعتبر هذه المعادن نتاج عمليات الأكسدة لمعدن اليورانينيت، ومعادن اليورانيوم الأولية الأخرى. توجد هذه المعادن غالبًا بكميات قليلة على حواف اليورانينيت، أو على شكل هالات تغطي سطحه. تتميز هذه المعادن باللون الأصفر إلى البرتقالي الذهبي، وتوجد على شكل بلورات دقيقة في الحجم.

يورانينيت وبيتشبلند Uraninite and Pitchblende (UO_2)

ينتمي كلا المعدنين إلى مجموعة معادن أكاسيد اليورانيوم. يرجع اسم اليورانينيت إلى اسم الكوكب يورانوس (Uranus) (كلمة إغريقية) والذي تم اكتشافه عام ١٧٩٢م قبل فترة وجيزة من اكتشاف عنصر اليورانيوم. يختلف اليورانينيت عن البيتشبلند في الحجم البلوري والهيئة البلورية وطريقة وجوده. يتبلور اليورنينيت بفصيلة المكعب (isometric)، ويوجد على شكل بطروخي كتلي، أو ترابي، أوعلى شكل بلورات مكعبية وثمانية الأوجه (شكل ٣-١أ-ج).

يتغاير لون المعدن من رمادي إلى أسود، أو بني، أو أخضر زيتوني، اعتماداً على العناصر الأخرى المصاحبة له. البريق تحت فلزي إلى قاري (pitchy an dull). الانفصام ضعيف في أربع اتجاهات. تتراوح الصلادة بين ٥-٦، ويتراوح الوزن النوعي بين ٧-١٠. المخدش أسود بني. يمثل البيتشبلند النوع الغروي (colloform) لليورانينيت (شكل ٣-١د)، ويتميز بالبريق القاري (pitch)، والشكل الكتلي، وأحياناً العنقودي.

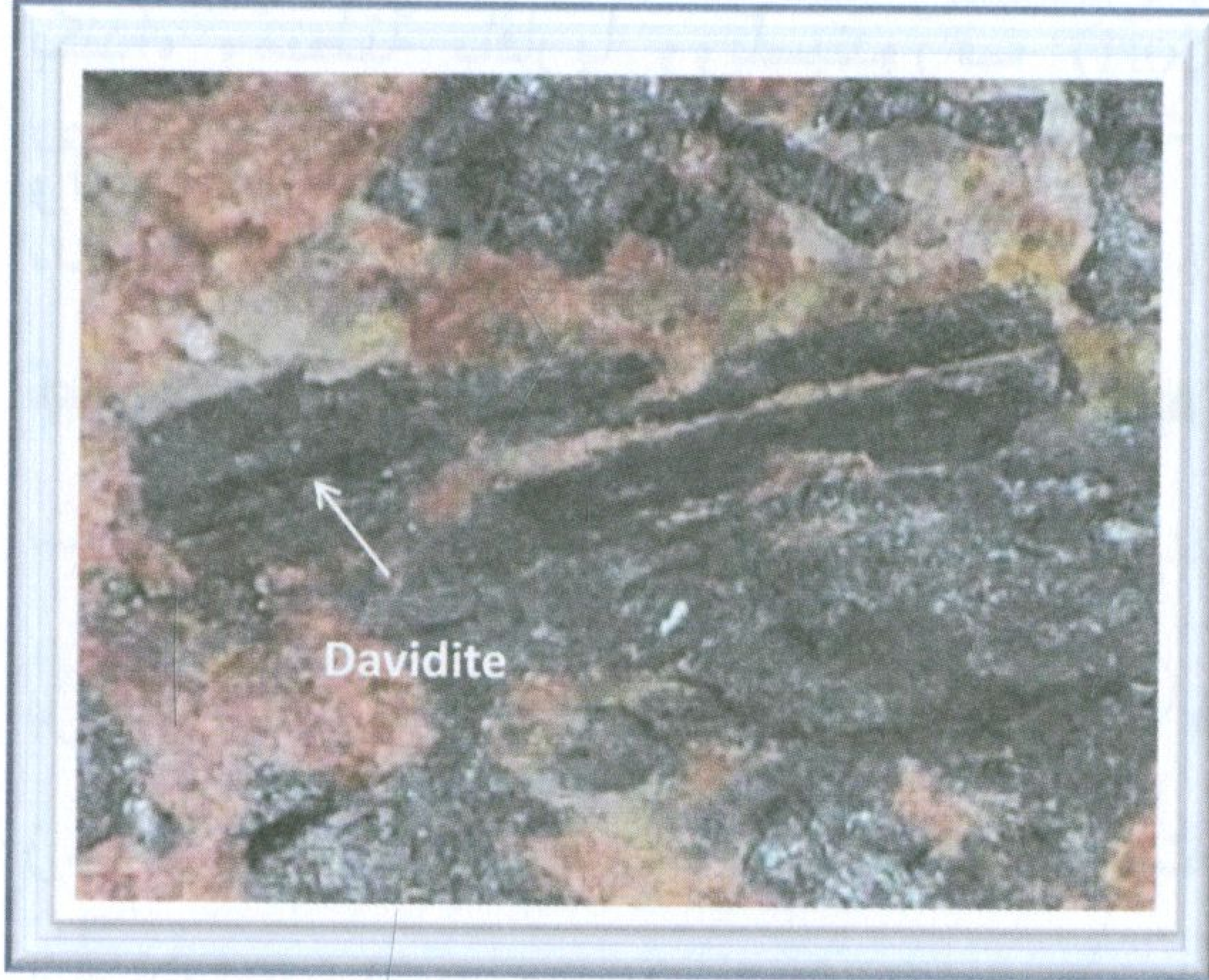


شكل ٣-١: صور فوتوغرافية لمجموعة معادن أكاسيد اليورانيوم. (أ) بلورة مكعبية الشكل وسوداء اللون لمعدن اليورانينيت بأرضية من معدن اليورانوفان أصفر اللون من منجم تيوفيلو أوتوني بالبرازيل Teofilo Otoni. (ب) صحبة من اليورانينيت، واليورانوفان والأوتونيت (http://flickr.com/photos/adamantine/1373212579/). (ج) بلورات صفراء، وبرتقالية اللون، لمعدني البكويرليت والرازرفوردين على معدن اليورانينيت أسود اللون، من منجم كاتانجا بالكونغو. (د) الشكل العنقودي للبيتشبلند (http://www.mindat.org/gallery.php?min=3222).

من المعادن المصاحبة: الكاسيتريت، والبيريت، والفضة، والأوتونيت، واليورانوفان، واليورانوسيرسيت، والتوربيرنيت، والميتا-توربيرنيت، والبيكويرليت، والرازرفوردين (شكل ٣-١ج). يمكن تمييز المعدن في الحقل ببريقه، ولونه، ومخدشه، ونشاطه الإشعاعي العالي. من أشهر أماكن وجوده: منطقة بيرجين (Bergen) بألمانيا، منطقة أوتون (Autun) بفرنسا، ومنطقة كورنوال (Cornwall) بإنجلترا، وكارولينا الشمالية بأمريكا، ومناطق عديدة بكندا، والكونغو، والبورتغال.

ديفيديت Davidite (La,Ce,Ca)(Y,U)(Ti, Fe)$_{20}$O$_{38}$

ينتمي المعدن إلى مجموعة معادن الأكاسيد المتعددة. يرجع اسم الديفيديت إلى الجيولوجي الأسترالي تينات دافيد (Tenatt David) عام ١٩٠٦م. هناك نوعان من الديفيديت، أحدهما غني باللانثانم، ويسمى ديفيديت-لانثانم، والآخر غني بالسيريوم، ويسمى ديفيديت-سيريوم. يتبلور المعدن بفصيلة الثلاثي (trigonal)، ولكنه محطم البنية (metamict) نتيجة النشاط الإشعاعي، حيث يتحول أحياناً من الشكل البلوري إلى الشكل عديم التبلور. اللون: أسود، أو أسود مخضر، أو أسود بني، أو بني غامق، أو محمر. لا يوجد به مستويات انفصام. المكسر محاري وسهل الكسر مما يؤدي إلى تكوّن حبيبات محارية صغيرة الحجم. كما يوجد المعدن على شكل كتلي، وبلورات كبيرة منشورية (شكل ٣-٢). الصلادة = ٦. البريق زجاجي إلى فلزي، والمخدش أسود بني. يوجد المعدن بصخور الجرانيت البيجماتيتي والسيانيت. من الصحبة المعدنية: أوتونيت، وروتيل، وتيتانيت، وماجنيتيت، وإلمينيت، وأباتيت، وتورمالين ومولبدينيت. من أشهر أماكن وجوده: صخور الحجر الرملي بكندا (منطقة باندورا Pandora)، ومنجم نيوفو كونتينينت (Nuevo Continente) بالمكسيك، وبصخور الدولوميت-الكالسيت-السكابوليت بمقاطعة تيتي Tete بموزامبيق.



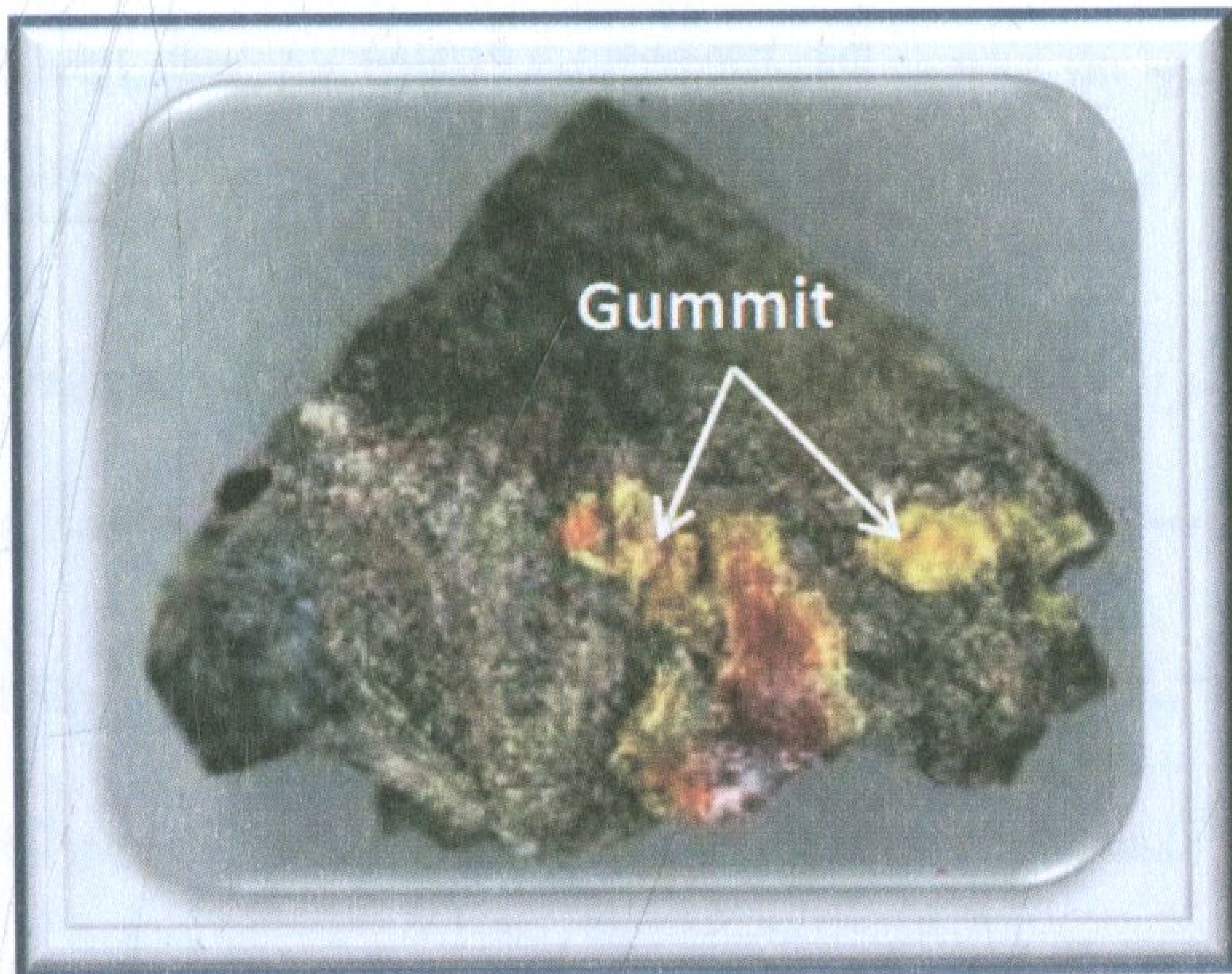
شكل ٣-٢: بلورات منشورية سوداء اللون لمعدن الديفيديت على الكربوناتيت، من منجم ساكيرينج Thackering بجنوب غرب أستراليا.

بيكويرليت Becquerlite $Ca(UO_2)_6O_4(OH)_6 .8H_2O$

يرجع اسم البيكورليت إلى الفيزيائي الفرنسي أنطوني بيكوريل عام ١٩٢٢. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات عمدانية أو كتلية. اللون أصفر ليموني أو أصفر بني (انظر شكل ٣-١ج)، المخدش أصفر، والانفصام جيد وتام. الصلادة=٢,٥، والوزن النوعي=٥,٢. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وشوبيت، وكوريت، وصوديييت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. يكثر وجود البيكويرليت بهضبة كولورادو، ومنجم إلدورادو (Eldorado) بكندا، ومنطقة بافاريا وويلسيندورف (Wölsendorf) بألمانيا، وأيضاً بفرنسا، والكونغو.

جاميت Gummit (Hydrated Uranium Oxide)

يرجع اسم الجاميت إلى شكله الشبيه باللبان (gum like). اللون أصفر، برتقالي (شكل ٣-٣)، أحمر برتقالي، بني محمر، أسود بني أو أسود. البريق زجاجي، أو شمعي، أو صمغي، أو قاتم. المخدش أصفر بني، أو أصفر زيتوني. الصلادة=٢,٥-٥. لا يوجد بالمعدن انفصام. المكسر غير مستوي أو محاري. الوزن النوعي=٣,٩-٦,٤ جم/سم^3. من المعادن المصاحبة: بولتووديت (boltwoodite)، كلاركيت (clarkeite)، كوريت، كاسوليت، صوديييت، يورانينيت ويورانوفان. من مناطق وجوده المعروفة:



شكل ٣-٣: بلورات برتقالية وصفراء لمعدن الجاميت من صخور البيجماتيت بمنطقة شوبا بروسيا.

صخور البيجماتيت بمنطقة راجبوتانا بالهند (Rajputana)، الكونغو، بوهيميا (Bohemia)، ساكسوني (Saxony) ومنطقة كارولينا الشمالية بأمريكا.

شوبيبت Shoepite ($UO_3.2H_2O$)

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٣م، ويرجع الاسم إلى عالم علم المعادن البلجيكي الفريد شويب (Alfred Schoep). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات عمدانية، أو كتلية، أو على هيئة قشور. المعدن أصفر اللون (شكل ٣-٤)، والبريق ترابي، والمخدش أصفر. تصل الصلادة إلى ٢,٥، ويتراوح الوزن النوعي بين ٣,٩ و٦,٤ جم/سم^3. الانفصام جيد وتام [001] إلى ضعيف. من المعادن المصاحبة: الفورميريت، والبيليتيت، والملاكيت، والإيانثينيت، والبيكويرليت، واليورانينيت. من مناطق وجوده المعروفة: هضبة كولورادو بأمريكا، مناطق ولسيندورف (Wölsendorf) وبافاريا والغابات السوداء بألمانيا، منطقتي مارجناك (Margnac) وهاوت-فيني (Haute-Vienne) بفرنسا، ومناجم شابا وشينكولوبوي بالكونغو.



شكل ٣-٤: (أ) حبيبات دقيقة من الشوبيت على الملاكيت بمنجم موسونوي بالكونغو. (www.trinityminerals.com/sm/uranium.shtml). (ب) صحبة من الفورماريريت مع الشوبيت والبيليتيت بمنجم شينكولوبوي Shinkolobwe بالكونغو (http://www.mineralatlas.com).

فورماريريت Fourmarierite $Pb(UO_2)_4O_3(OH)_4 . 4H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٤م نسبةً إلى الجيولوجي البلجيكي باول فورماريير (Paul Fourmarier). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات عمدانية، أو كتلية، أو إبرية. يُظهر المعدن لونًا بنيًا برتقاليًا إلى بني محمر (شكل ٣-٤ب). البريق صمغي، والمخدش برتقالي. تتراوح الصلادة بين ٣ و ٤، ويساوي الوزن النوعي ٥,٧٤ جم/سم^3. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، وغير مميز بالمستوى [100]. من المعادن المصاحبة: اليورانيريت، والشوبيت، والبيليتيت، والكاسوليت، والتوربيرنيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من مناطق وجوده المعروفة: يوجد المعدن بالعديد من المناطق ، مثل منجم إيلدورادو (Eldorado) وجريت بيير (Great Bear) بكندا، مقاطعة أجمير (Ajmer) بالهند، ومنجمي شينكولوبوي وشابا بالكونغو.

فاندينبراندايت Vandenbrandeite $[Cu(UO_2)(OH)_4]$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٣٢م، ويرجع الاسم إلى عالم علم المعادن البلجيكي بيير فان دين براندي (Pierre van den Brande). يتبلور المعدن بفصيلة ثلاثي الميل، ويوجد على شكل قشور. اللون أخضر غامق، إلى أخضر مسود (شكل ٣-٥)، والبريق زجاجي، والمخدش أخضر. تصل الصلادة إلى ٤، والوزن النوعي إلى ٥,٨. الانفصام جيد وتام [110]. من المعادن المصاحبة: اليورانوفان، والكاسوليت، والسكلودويسكيت،



شكل ٣-٥: صحبة من الفاندينبراندايت والجويليمينيت من منجم موسونوي بالكونغو.
(www.trinity-minerals.com/sm/uranium.shtml)

والملاكيت، والتوربيرنيت، والجويميليت، والبيتشبليند. من مناطق وجوده المعروفة: مناجم ريبيجاك (Rabejac)، ولوديفي (Lodéve)، وهيراولت (Herault) بفرنسا، منجمي كالونجوي (Kalongwe) وشابا Shaba بالكونغو.

كوريت Curite $Pb_2U_5^{6+}O_{17}.4H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢١م، ويرجع الاسم إلى عالم الفيزياء الفرنسي بيير كوري (Pierre Curie). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات منشورية، أوعمدانية، أو كتلية، أو قشور. اللون أحمر برتقالي (شكل ٣-٦أ)، والمخدش برتقالي، والبريق صمغي. تتراوح الصلادة بين ٤ و ٥، ويبلغ الوزن النوعي ٧,٣٧ جم/سم٣. الانفصام جيد وتام [100] [110]. من المعادن المصاحبة: الجاميت، والفورميريت، والشوبيت، والصودييت، والكاسوليت، والدويينديت، والفانديندريشيت (-vandendriess cheite)، والتوربيرنيت، واليورانينيت. من مناطق وجوده المعروفة: منطقتي لاكروزيللي (La Crouzille)، وباي دي دوم (Puy de Dôme) بفرنسا، ومنطقتي



شكل ٣-٦: (أ) كوريت من منجم شينكولوبوي (Shinkolobwe) بالكونغو (http://www.mindat.org/ gallery.php?min=1197). (ب) صحبة من اليورانوسفيريت والتوربيرنيت من منطقة فاندورت (Fundort) بألمانيا.

إللويلير (Ellweiler)، وبفالتز (Pfalz) بألمانيا، منجمي شينكولوبوي، وشابا Shaba بالكونغو، ومنطقة بيماسواندرو (Bemasoandro) بمدغشقر.

يورانوسفيريت Uranospherite $Bi_2U_2O_9.3H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٣م، ويعود الاسم إلى محتوى المعدن من اليورانيوم، وإلى شكله الكروي (sphere). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات شبه كروية، أو ليفية، أو شعاعية. يُظهر المعدن لوناً أحمرًا طوبيًا، أو أصفرًا برتقاليًا (شكل ٣-٦ب)، والبريق صمغي إلى قاتم، والمخدش أصفر. تتراوح الصلادة بين ٢ إلى ٣، ويصل الوزن النوعي إلى ٦,٣٦جم/سم٣. الانفصام جيد وتام [001]. من المعادن المصاحبة: اليورانوسبينيت، والفالبورجيت (walpurgite)، والتروبيرنيت، والزيونيريت (zeunerite)، والإريثرايت (erythrite). من مناطق وجوده المعروفة: منجم فيسير هيرش (Weisser Hirsch)، ومنطقة نيوشتاتل (Newstsadtl)، وساكسين (Sachsen) بألمانيا، منطقتي كيرسيجاليس-إن-ليجنول (Kersegalec-en-Lignol)، وفيندي (Vendée) بفرنسا.

ماسيويت Masuyit $(Pb_3U_8^{6+}O_{27}.10H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٤٧م، نسبةً إلى الجيولوجي البلجيكي جوستاف ماسوي (Gustave Masuy). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات عمدانية ذات شكل سداسي كاذب. يُظهر المعدن لوناً برتقاليًا محمرًا، أو برتقاليًا بنيًا (شكل ٣-٧أ). البريق صمغي إلى قاتم، والمخدش برتقالي. صلادة المعدن غير معروفة، بينما يصل الوزن النوعي إلى ٥,٠٨ جم/سم٣. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، وغير مميز بالمستوى

[010] . يصاحب معدن اليورانيريت، ومن أشهر مناطق وجوده: مناجم لوديفي (Lodéve)، وهيراولت (Herault) بفرنسا، منجمي شينكولوبوي، وشابا (Shaba) بالكونغو.

بيليتيت Billietite $[Ba(UO_2)_6O4(OH)6\cdot8(H_2O)]$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٤٧م، نسبةً إلى عالم البلورات البلجيكي فاليري بيليت (Valére Billiet). يظهر المعدن لونًا بنيًا مصفرًا إلى بنيّ ذهبيّ (شكل ٣-٧ب). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات توأمية، أو عمدانية ذات شكل سداسي كاذب. البريق صمغي، والمخدش أصفر. صلادة المعدن غير معروفة، بينما يصل الوزن النوعي إلى ٥,٢٨ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. من المعادن المصاحبة: الفورماريريت، واليورانوفان، والتوربيرنيت، والشوبيت، والجاميت. من مناطق وجوده المعروفة: مناجم كروث (Kruth) ومارجناك ٢ (Margnac II) بفرنسا، الغابات السوداء بجنوب ألمانيا، ومنجمي شينكولوبوي، وشابا (Shaba) بالكونغو.

إيانثينيت Ianthinite $(U^{4+}U_5^{6+}O_{17}.10H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٦م، نسبةً إلى الكلمة اليونانية *(Ianthinos)*، والتي تعني بنفسجي اللون. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل نسيلي (laths)، أو صفائح صغيرة. يظهر المعدن لونًا اسودًا- بنفسجيًا (شكل ٣-٧ج). البريق تحت فلزي، والمخدش بني- بنفسجي. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٣، بينما يصل الوزن النوعي إلى ٥,١٦ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. من المعادن المصاحبة: الشوبيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من مناطق وجوده المعروفة: مناطق ويلسيندورف، وبافاريا،

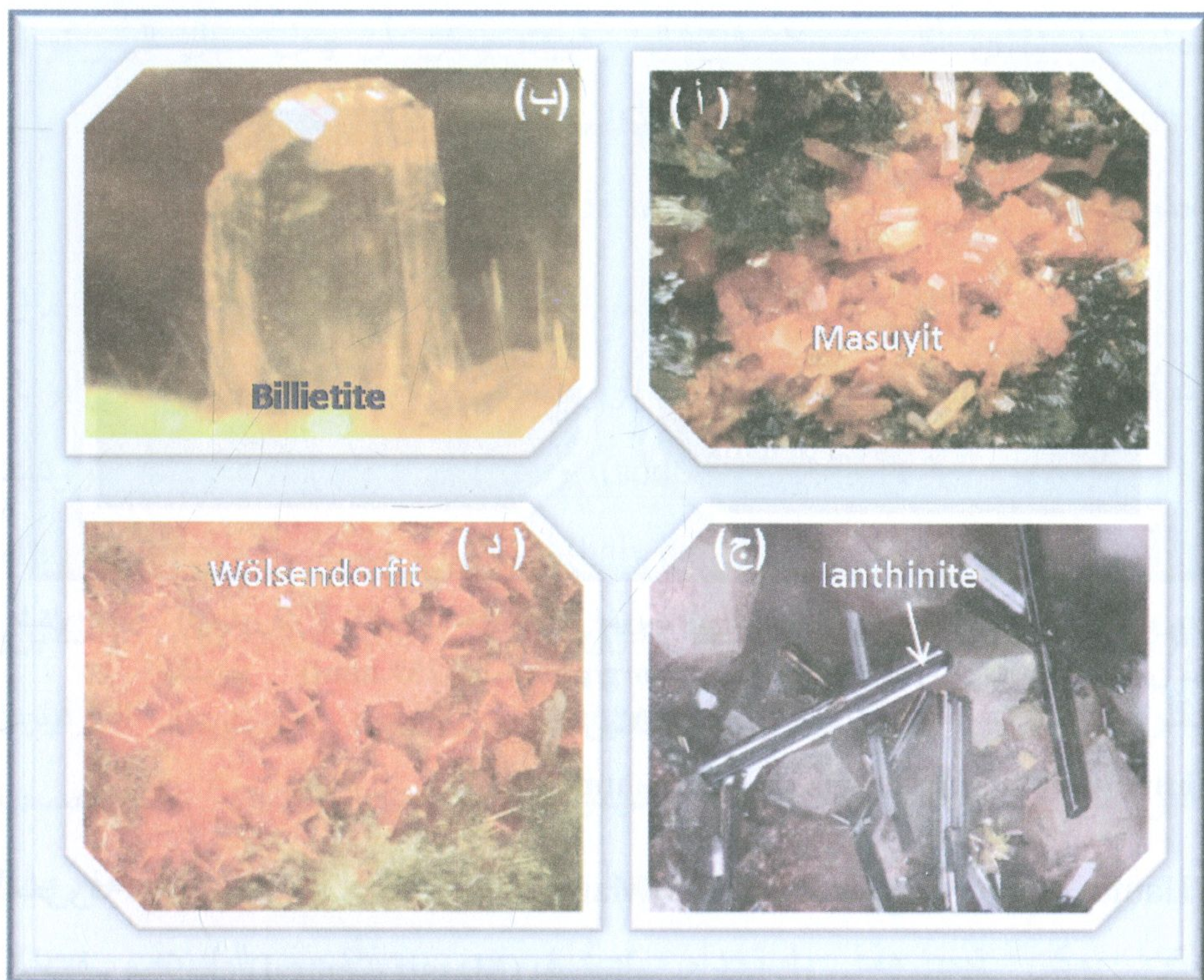
وبادن–فورتيمبرج بألمانيا، ومناطق بيجاي (Bigay)، ولاشاوكس (Lachaux)، ولويري Loire بفرنسا، ومنجمي شينكولوبوي، وشابا بالكونغو.

ولسيندورفيت Wölsendorfit [$(Pb,Ca)U_2O_7 \cdot 2H_2O$]

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٧م، نسبةً إلى مكان وجوده بمنطقة ويلسيندورف بألمانيا. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل تجمع صفائحي دقيق التحبب. يظهر المعدن لونًا أحمرًا إلى أحمر برتقالي (شكل ٣–٧د). البريق صمغي إلى زجاجي، والمخدش أحمر. تصل الصلادة إلى ٥، والوزن النوعي إلى ٦,٨ جم/سم^3. الانفصام جيد بالمستوى [001]. من المعادن المصاحبة: الإيانثينيت، والفلوريت، والبيتشبلند، وبعض معادن اليورانيوم الثانوية. من مناطق وجوده المعروفة: ويلسيندورف، وبفاريا، والغابات السوداء بألمانيا، مناجم مارجناك٢ (Margnac II) وهاوت–فيني (Haute-Vienne) بفرنسا، ومنجمي شينكولوبوي، وشابا بالكونغو.

راميويت Rameauite ($K_2CaU_6O_{20}.9H_2O$)

تم التعرف على المعدن عام ١٩٧٢م، نسبةً إلى مكتشف رواسب اليورانيوم الحاوية على هذا المعدن، والذي يدعى جاكويس راميو (Jacques Rameau). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، ويوجد على شكل بلورات منشورية ذات مقطع سداسي كاذب. يظهر المعدن لونًا برتقاليًا (شكل ٣–٨أ). الصلادة غير معروفة، ويساوي الوزن النوعي ٥,٦ جم/سم^3. الانفصام جيد بالمستوى [010]. من المعادن المصاحبة: البيتشبلند، والكالسيت، واليورانوفان، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من مناطق وجوده المعروفة: مناجم مارجناك، وهاوت–فيني، وماسيف سنترال بفرنسا.



شكل ٣-٧: (أ) ماسيــويت من منجم شينكــولوبوي بالكونغــو. (ب) بلــورة منشورية من البيليتيت. (ج) بلــورات منشورية من الإيانثينيت برواسب وادي كرنكيلباخ بالغابات السوداء، ألمانيا. (د) ولسيندورفيت من منجم شينكولوبوي بالكونغو (http://www. mineralienatlas.de/ lexikon/index.php/ MineralData?mineral).

أجرينيريت Agrinierit $(K_2,Ca,Sr)\ U_3O_{10}.4H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٧٢م، نسبةً إلى مهندس فرنسي يدعى هينري أجرينير (Henri Agrinier). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات عمدانية ذات مقطع سداسي كاذب. يظهر المعدن لونًا برتقاليًا، أو أصفر (شكل ٣-٨ب). الصلادة غير معروفة، ويصل الوزن النوعي إلى ٥,٧ جم/سم^٣. الانفصام جيد بالمستوى [001]. من المعادن المصاحبة: الجاميت، واليورانوفان، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من مناطق وجوده



شكل ٣-٨: (أ) بلورات برتقالية شفافة من الراميويت في معدن اليورانينيت من منجم شنكولوبوي بالكونغو (www.mindat.org/photo-147259.html). (ب) بلورات صفراء اللون من الأجرينيريت في الكوارتز من منجم مارجناك بفرنسا.

(http://www.mindat.org/photo-139706.html)

المعروفة: مناجم مارجناك (Margnac)، وهاوت-فيني (Haute-Vienne)، وماسيف سنترال (Massif Central) بفرنسا.

٤- مجموعة معادن سيليكات اليورانيوم
Uranium Silicates

تعتبر هذه المجموعة أكثر المجاميع انحلالاً، ويرجع ذلك إلى وفرة السيليكون كمكون من مكونات القشرة الأرضية. قد يتكون بعض من هذه المعادن من جراء تجوية المعادن الأولية في موقعها الأصلي، أو قد تترسب من محاليل غنية باليورانيوم وعناصر أخرى، مثل تكوّن معدن اليورانوفان من تجوية اليورانينيت، ويكون مصاحبًا له، كما يتكون اليورانوفان بالترسيب من محاليل غنية بالسيليكون، واليورانيوم، والكالسيوم. يمكن أن تتكون بعض معادن هذه المجموعة من إحلال معدن محل آخر. على سبيل المثال، عندما يتعرض اليورانوفان إلى مياه الأمطار، ذات المحتوى المنخفض من الكربونات، ودرجة

الحامضية (pH) أقل من ٧، فإن الصودييت يمكن أن يحل محل اليورانوفان (Finch, 1994). كما يمكن أن يحل الكاسوليت محل السكلروسكيت، عندما يزيد محتوى الرصاص المشع (Isobe *et al.*, 1992).

تضم هذه المجموعة العديد من معادن سيليكات اليورانيوم، مثل: الكوفينيت (coffinite)، واليورانوثوريت (uranothorite)، واليورانوفان (uranophane)، والصودييت (soddyite)، والكاسوليت (kasolite)، والبولتوودايت (boltwoodite)، والهايوييت (haiweeite)، والثوروجاميت (thorogummite)، والويكسيت (weeksite)، والسكلودوويسكيت (sklodowskite)، والكابرو سكلودوويسكيت (cuprosklodowskite). يعتبر معدني الكوفينيت واليورانوثوريت أهم معادن هذه المجموعة. يتواجد الكوفينيت غالباً بصحبة اليورانينيت، حيث يصعب التمييز بينهما من خلال الصفات الفيزيائية المعروفة، ولكن يمكن تمييزهما باستخدام تحاليل حيود الأشعة السينية (X-ray diffraction). يعتبر اليورانوثوريت أحد أنواع معادن الثوريوم، والذي يحتوى على نسبة يورانيوم تزيد عن ١٢٪. يوجد اليورانوثوريت بالرواسب الركامية، وصخور النايس، والصخور الجرانيتية. يتميز المعدن باللون الأسود، أو الرمادي إلى البني، يمكن تمييزه عن اليورانينيت بكثافته النوعية الأقل. يعد معدن اليورانوفان من أكثر المعادن الثانوية شيوعاً بهذه المجموعة. يوجد المعدن بالعديد من البيئات الجيولوجية المختلفة، ولكن يكثر وجوده بصخور البيجماتيت، والجرانيتات المعرضة لعمليات التغاير. يوجد اليورانوفان غالباً كناتج تجوية لليورانينيت. يعتبر معدن البيتا-يورانوفان أقل شيوعاً من معدن اليورانوفان، رغم تشابهما في التركيب الكيميائي، ولكن يمكن التمييز بينهما باستخدام تحاليل حيود الأشعة السينية.

يعتبر معدن البيلتويديت من معادن سيليكات اليورانيوم الأقل شيوعاً، حيث يوجد غالباً برواسب الحجر الرملي. على عكس ذلك، نجد أن الكاسوليت من المعادن الثانوية الشائعة بهذه المجموعة، والذي يحتوي على الرصاص. يوجد المعدن بكثرة بصخور البيجماتيت والجرانيت. كما تعتبر معادن الويكسيت (weeksite) أهم معادن هذه المجموعة حيث تصل نسبة اليورانيوم إلى السيليكون ٢:٥ (Burns, 1999). توجد هذه المعادن في البيئات الجافة، حيث يحدث تبخيرًا للمياه الغنية بالسيليكون، تحت ظروف درجة حامضية (pH) عالية. على عكس معادن مجموعة الكربونات والكبريتات، نجد أن معادن مجموعة السيليكات لا تذوب بسهولة في المياه العذبة.

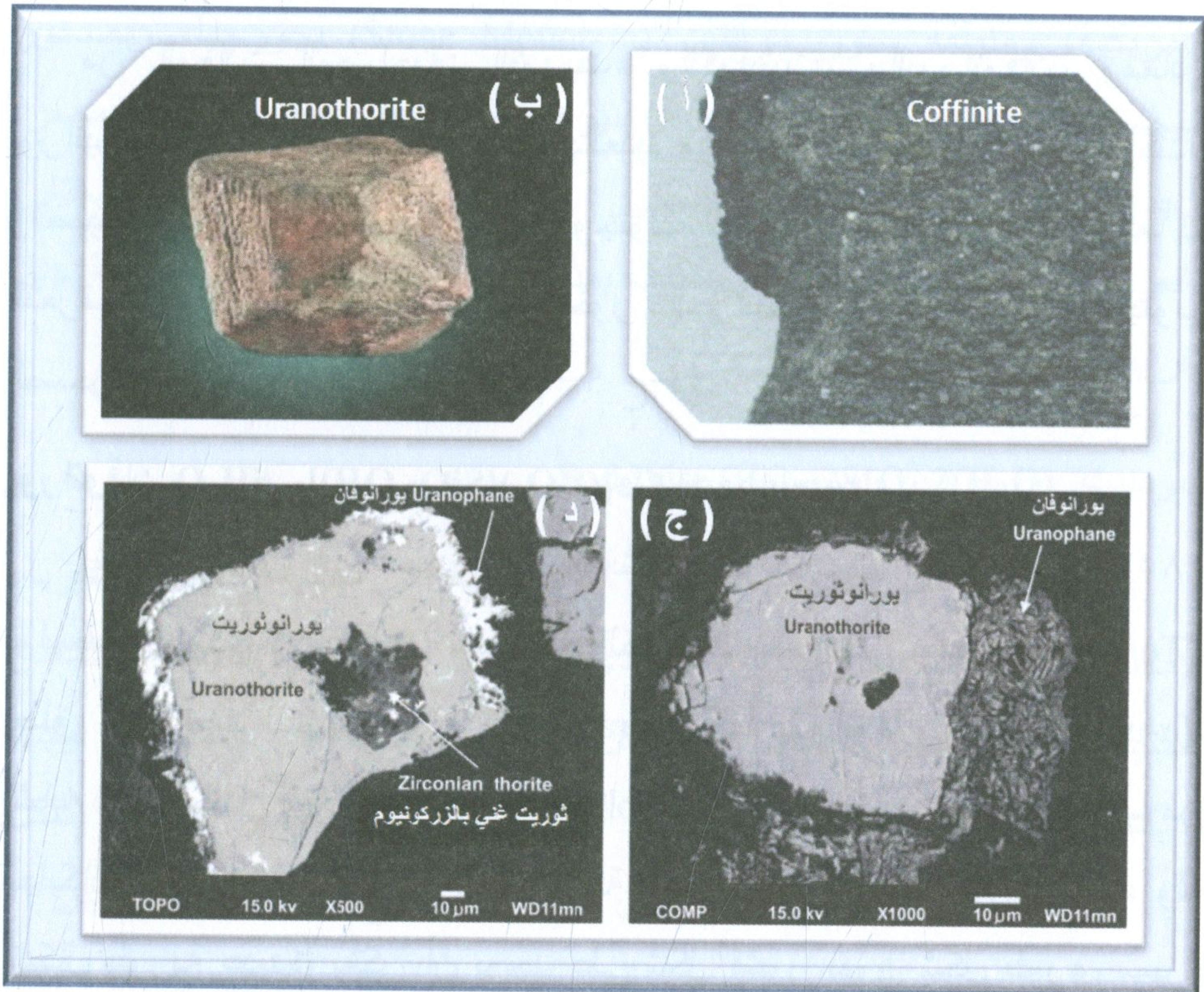
كوفينيت Coffinite$[U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$

ينتمي المعدن إلى مجموعة معادن السيليكات البسيطة. يأتي اسم الكوفينيت عن العالم روبين كوفين (Ruben Coffen) عام ١٩٥٦، وهو من المتميزين في دراسة رواسب اليورانيوم بهضبة كولورادو. ينتمي المعدن إلى مجموعة الزركون. المعدن أيزوتروبي وعادةً ما يعاني من تحطم بنيته في شكل شبكي من جراء النشاط الإشعاعي (mtamict). يوجد عادةً على شكل حبيبات، وأيضاً على شكل كتلي، ونادراً ما يوجد على شكل بلورات منشورية منتهية بأشكال هرمية. اللون أسود، أو أصفر إلى بني (شكل ٣-٩أ). المخدش أسود بني والبريق قاتم. الصلادة = ٥-٦، والوزن النوعي = ٣,٥-٥,١. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، ثوريت، يورانوثوريت، بيريت، ماركيزيت، ومعادن طينية. يوجد المعدن في العديد من رواسب اليورانيوم بهضبة كولورادو بأمريكا، ومناطق بافاريا، وساكسوني، والعديد من المناطق الأخرى بألمانيا، منطقة كارينثيا (Carinthia) بالنمسا، ومنطقة كوفار (Kovar) ببولندا، وأيضاً يوجد في

أسبانيا، ويوغسلافيا، وروسيا، وجنوب أفريقيا. يعتبر من أهم معادن اليورانيوم بالصخور الرسوبية.

يورانوثوريت Uranothorite $(U,Th)SiO_4$

تم التعرف على اليورانوثوريت (يعرف أيضاً بالثوريت الغني باليورانيوم) لأول مرة عام ١٩٢٧ في عينات من منجم فلسبار بأونتاريو بكندا، بواسطة إيلسفورث (Ellsworth). يعتبر اليورانوثوريت أحد أعضاء سلسلة محلول



شكل ٣-٩: (أ) كوفينيت (www.mineralinfo.org/mineraux/Coffinite.htm). (ب) بلورة لمعدن اليورانوثوريت من منجم كيمب Kemp بولاية أونتاريو، كندا (http://www.mindat.org/gallery.php?min=8611). (ج-د) صورة بالمسبار الإلكتروني لمعدن اليورانوثوريت (ثوريت غني باليورانيوم) مع صحبة من اليورانوفان والثوريت الغني بالزركونيوم بالصخور الجرانيتية لمنطقة أم آرا (Abd El-Naby, 2009b).

صلب، يمثل طرفيها معدني الثوريت والكوفينيت. يطلق على النوع المهدرج الغني بالثوريوم، ثوروجاميت، بينما النوع الذي يحتوي على ثوريوم أكثر من اليورانيوم، فإنه يسمى يورانوثوريت، ويطلق اسم كوفينيت على المعدن الذي يحتوى على نسبة يورانيوم أكثر من الثوريوم. يُظهر المعدن لونًا أصفرًا بنيًا إلى أصفر برتقالي (شكل ٣-٩ ب). البريق صمغي، والمخدش بني فاتح. الصلادة تساوي ٥، والوزن النوعي يساوي ٥,٣٥ جم/سم^{٣}. الانفصام ضعيف بالمستوى [110].

من المعادن المصاحبة: الثوريت، والكوفينيت، واليورانوفان، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. يوجد المعدن بالعديد من بلدان العالم مثل: النمسا، وكندا، والصين، وفرنسا، وألمانيا، وإيطاليا، وجنوب أفريقيا، والسويد، وأمريكا، كما تم التعرف على اليورانوثوريت بالصخور الجرانيتية لمنطقة أم آرا بجنوب الصحراء الشرقية المصرية (شكل ٣-٩ ج-د).

يورانوفان Uranophane $Ca[(UO_2)(SiO_3\ OH)]_2\ .5H_2O$

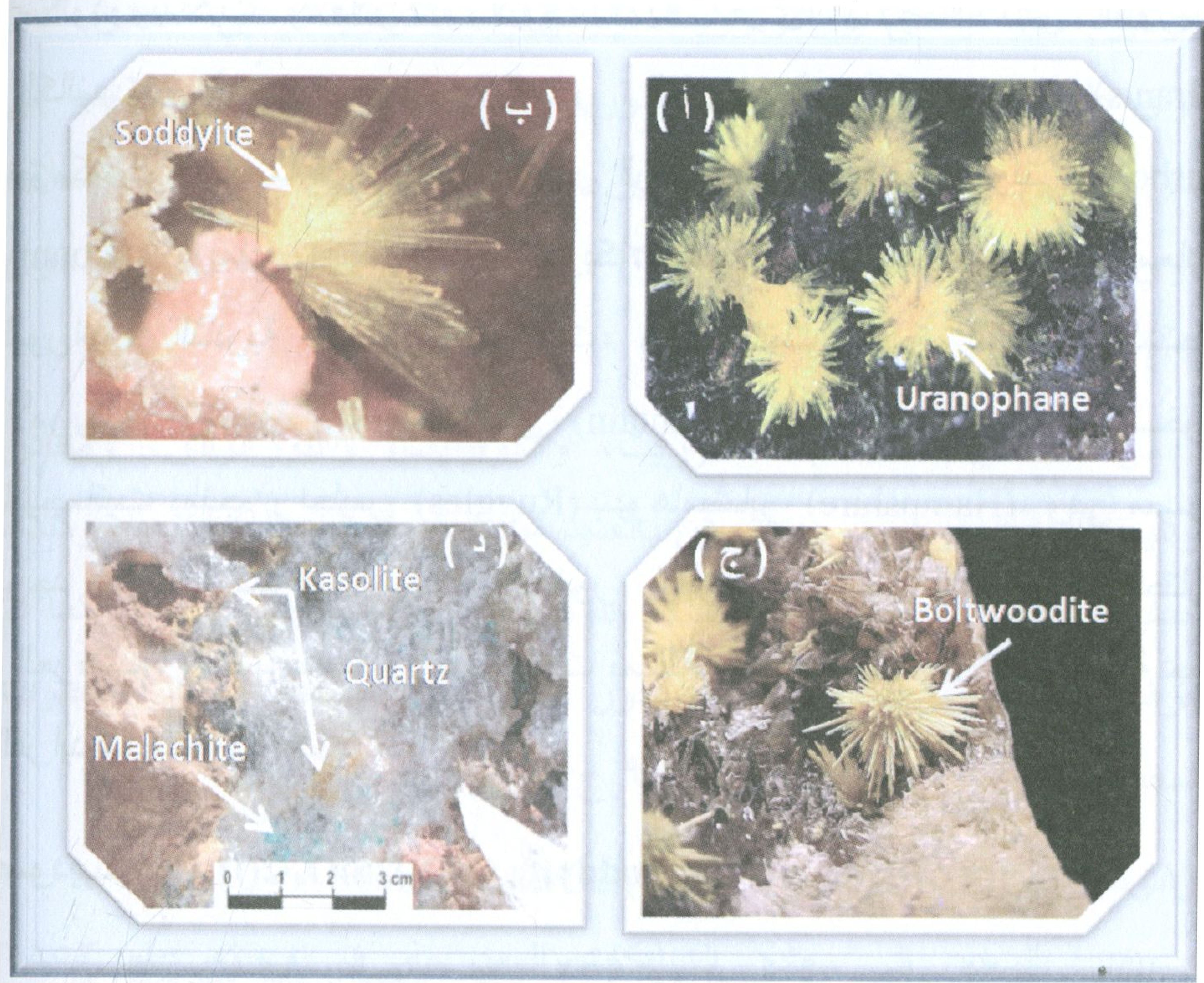
ينتمي المعدن إلى معادن السيليكات المهدرجة. تم تسميته عام ١٨٥٣ بواسطة ويبسكي (Websky) نسبة إلى الكلمة اليونانية "كي يظهر To appear". يطلق عليه أيضاً اسم يورانوتيل (uranotile)، وألفا-يورانوفان (α-uranophane). يشابه شكلياً معدن بيتا-يورانوفان (ß-Uranophane). يتكون المعدن كيميائياً من سيليكات اليورانيوم والكالسيوم المهدرجة. يتبلور في فصيلة الميل الواحد، وله أشكال بلورية عديدة، يمكن أن يوجد على شكل قشور بدون شكل بلوري مميز، أو على شكل إبري، أو ليفي، أو حبيبات شعاعية (شكل٣-١٠أ). يتميز المعدن باللون الأصفر الكناري، والبني المصفر، والأخضر المصفر، والبرتقالي المصفر، والأصفر الفاتح. البريق زجاجي، والبلورات شفافة إلى غير شفافة.

الانفصام جيد وتام في اتجاه واحد. الصلادة=٢-٣، والوزن النوعي حوالي ٣,٨. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، توربيرينيت، أوتونيت، زيونيريت وسكلودوويسكيت ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى، بالإضافة إلى الفلوريت والكالسيت. يوجد بصخور الحجر الجيري بمنطقة جرانتس (Grants) بنيومكسيكو، وأيضاً في رواسب الحجر الرملي بمنطقة كربون كونتي (Carbon County)، بويمنج (Wyoming)، أمريكا. كما يوجد كأهم معدن من معادن اليورانيوم الثانوية بصخور الجرانيت، والبيجماتيت بشرق الولايات المتحدة الأمريكية، ومنطقة ستون مونتين (Stone Mountain) بجورجيا، وبصخور البيجماتيت بمنجم راجليس (Ruggles) بنيوهامبشاير (Hampshire). وفي مصر، يوجد كمعدن ثانوي أساسي بصخور الجرانيت بمنطقة أم آرا، وجتار، والعرضية، وأيضاً بصخور البيجماتيت بمنطقة ريبداب (Ribdab)، ومنطقة جبل الفرايد بالصحراء الشرقية.

صوديييت Soddyite $(UO_2)2SiO_4{\cdot}2(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٢م، نسبةً إلى عالم الكيمياء والفيزياء الإنجليزي الذي يدعى فريدريك صودي (Frederick Soddy). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل بلورات عمدانية، أو هرمية، أو ليفية، أو كتلية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا، أو أصفرًا كناريًا، أو أخضرًا مصفرًا (شكل ٣-١٠ب). البريق زجاجي، والمخدش أصفر. تتراوح صلادة المعدن بين ٣ و ٤، بينما يصل الوزن النوعي إلى ٤,٧ جم/سم^3. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، وجيد بالمستوى [111]. يصاحب معدن اليورانيريت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من مناطق وجوده المعروفة: منجم شينكولوبوي، وشابا

بالكونغو، منجمي ماسونوي (Musonoi)، وكولونجوي (Kolongwe) بجنوب أفريقيا.



شكل ٣-١٠: (ج) بلـــورات إبرية لمعدن اليورانوفان من مقاطعة مت بينتير Mt Painter بجنوب أفريقيا. (ب) صوديبيت من منجم شينكولوبوي بالكونغو. (ج) بلورات إبرية برتقالية اللون لمعدن البولتوودايت من منطقة سواكوبموند بناميبيا. (د) كاسوليت من منطقة جبل صايد (Dawood *et al.*, 2010).

بولتووديت Boltwoodite $HK(UO_2)(SiO_4)\cdot1.5(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٦م، نسبةً إلى عالم الكيمياء الإشعاعية بجامعة يال Yale، والذي يدعى بيرترام بولتوود (Bertram Boltwood). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، ويوجد على شكل بلورات إبرية، أو ليفية، أو كتلية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا إلى أصفر فاتح (شكل ٣-١٠ج). البريق

زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش أبيض. تتراوح صلادة المعدن بين ٣,٥ و ٤، بينما يصل الوزن النوعي إلى ٣,٦ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]، ومميز بالمستوى [001]. يصاحب معدن اليورانوفان كنواتج تجوية لمعدن اليورانينيت، بالإضافة إلى معادن سيليكات اليورانيوم الثانوية الأخرى. من مناطق وجوده المعروفة: منجم ويليمز بأستون (Easton)، منجم أرانديس (Arandis) بناميبيا، منجم ميبونجا (Myponga) باستراليا، ومنجم لاشيكويتا (La Chiquita) بالأرجنتين.

كاسوليت Kasolite [$Pb(UO_2)SiO_4{\cdot}(H_2O)$]

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢١م، نسبةً إلى اسم المكان الذي أكتشف فيه. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، ويوجد على شكل بلورات مستطيلة، أو نسلية، أو شعاعية، أو ليفية، أو كتلية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا غامقًا إلى برتقالي (شكل ٣-١٠د). البريق صمغي، والمخدش أصفر بني فاتح. تصل صلادة المعدن إلى ٤,٥، والوزن النوعي إلى ٥ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد وتام بالمستوى [100]، وجيد بالمستوى [100] و [010]. يصاحب معدن اليورانوفان كنواتج تجوية لمعدن اليورانينيت، بالإضافة إلى معادن سيليكات اليورانيوم الثانوية الأخرى. من مناطق وجوده المعروفة: يوجد المعدن بالعديد من مناجم اليورانيوم بكندا، واستراليا، والنرويج، وفرنسا، وإيطاليا، والجابون، والكونغو. كما يوجد المعدن بصخور البيجماتيت بمنطقة جبل صايد، المملكة العربية السعودية.

سكلودوويسكيت Sklodowskite $(H_3O)_2Mg(UO_2)_2(SiO_4)_2{\cdot}4H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٤م، ويرجع الاسم إلى الكيميائية الفرنسية ماريا سكلودوويسكا كوري (Maria Sklodowska Curie). يتبلور المعدن بفصيلة

الميل الواحد، ويوجد على شكل بلورات إبرية، أو ليفية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا فاتحًا إلى أصفر مخضر (شكل ٣-١١أ). البريق زجاجي، والمخدش أبيض مصفر. تتراوح صلادة المعدن بين ٢ و ٣، ويصل الوزن النوعي إلى ٣,٥٤ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد وتام بالمستوى [100]. ينتج المعدن عن تجوية اليورانينيت، ويصاحبه معادن اليورانيوم الثانوية الأخرى. يوجد المعدن بالعديد من مناجم اليورانيوم بكندا، واستراليا، والبرازيل، والكونغو.

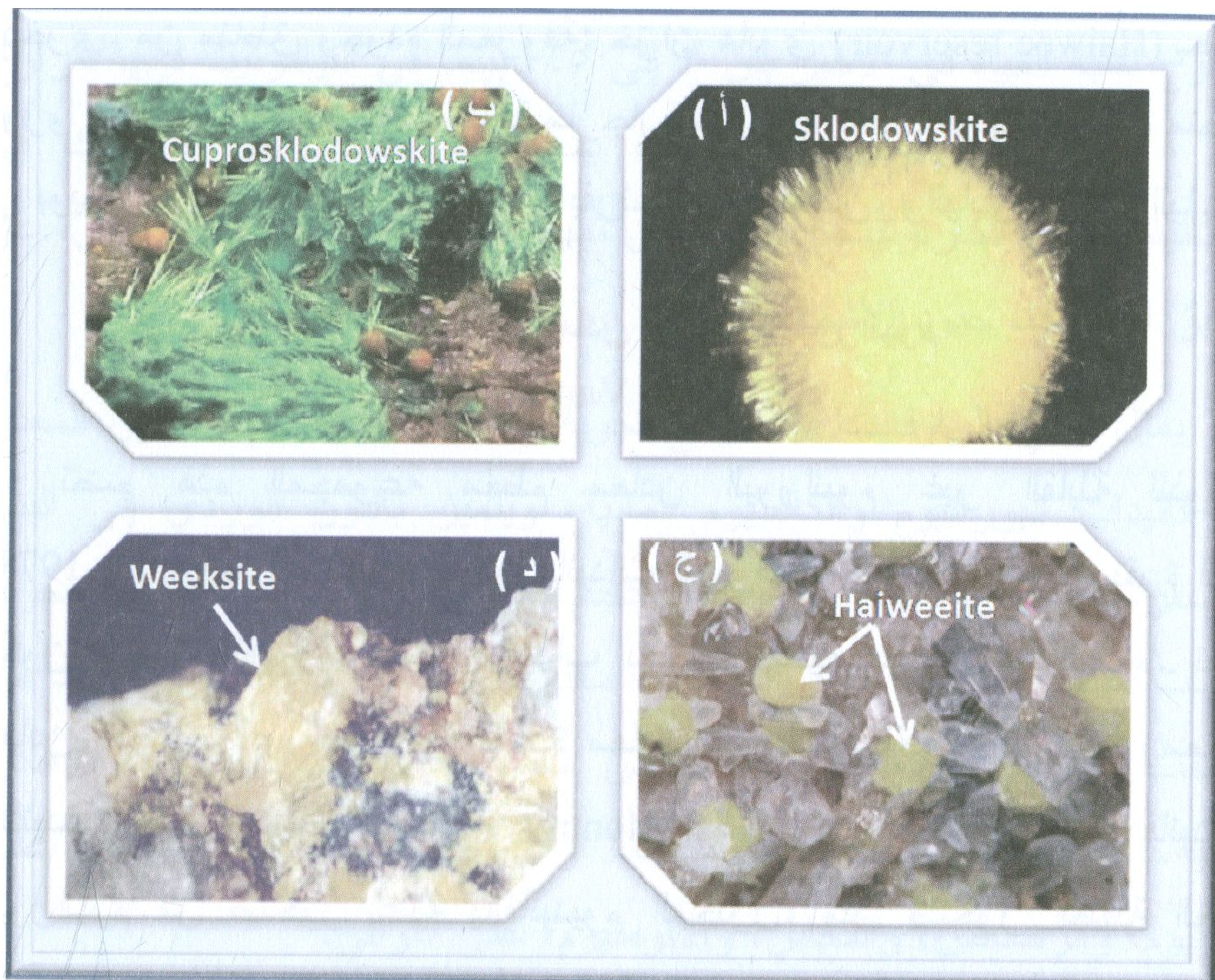
كابروسكلودوويسكيت Cuprosklodowskite $Cu[(UO_2)(SiO_2OH)]_2\cdot6(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٣٣م، ويرجع الاسم إلى إحتوائه على عنصر النحاس، وإلى تشابهه مع معدن السكلودوويسكيت. يتبلور المعدن بفصيلة الميول الثلاثة، ويوجد على شكل بلورات إبرية، أو وردية، أو كتلية. يظهر المعدن لونًا أخضرًا زرعيًا (شكل ٣-١١ب). البريق زجاجي إلى حريري، والمخدش أصفر مخضر. تصل صلادة المعدن إلى ٤ والوزن النوعي إلى ٣,٨ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد بالمستوى [100] . يوجد المعدن بنطق أكسدة خامات اليورانيوم التي تحتوي على كبريتيدات النحاس، ويصاحبه معادن اليورانيوم الثانوية الأخرى. يوجد المعدن بالعديد من مناجم اليورانيوم بكندا، واستراليا، والتشيك، والمغرب، والكونغو.

هايوييت Haiweeite $Ca[(UO_2)_2Si_5O_{12}(OH)_2]\cdot3H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٩م، ويرجع الاسم إلى المكان الذي اكتشف فيه. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، ويوجد على شكل بلورات إبرية، أو صفائحية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا فاتحًا إلى أصفر مخضر (شكل ٣-١١ج). البريق لؤلؤي إلى قاتم، والمخدش أبيض. تصل صلادة المعدن إلى ٣,٥، والوزن النوعي إلى ٣,٣٥ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد بالمستوى [001]. يتواجد المعدن بنطق أكسدة خامات اليورانيوم الأولية، مثل اليورانينيت،

ويصاحبه بعض معادن اليورانيوم الثانوية الأخرى. من مناطق وجوده المعروفة: خزان هايوي (Haiwee reservoir) بجبال كوزو (Mountains) Coso، ومنطقة سالزبوج (Salzburg) بالنمسا، ورواسب هينجيوتوجي (Hingyotoge) باليابان، ومنجم نيشابور (Nishapur) بإيران، ومنطقة بيراس (Perus) بالبرازيل.



شكل ٣-١١: (أ) بلورات إبرية لمعدن السكلودوويسكيت من منجم شينكولوبوي بالكونغو. (ب) بلورات خضراء اللون لمعدن الكابروسكلودوويسكيت من منجم كاتانجا بالكونغو (www.trinityminerals.com). (ج) هاوييت من منطقة تيفيلو أوتوني Teofilo Otoni بالبرازيل (http://www.uraniumminerals.com/UTh/Haiweeite.htm). (د) ويكسيت من منجم سفورنوست Svornost بجمهورية التشيك (Photo: Maurice de Graaf).

ويكسيت Weeksite $(K,Na)_2(UO_2)_2(Si_5O_{13}).3H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٠م، ويرجع الاسم إلى أستاذ الجيولوجيا بجامعة تيمبيل (Temple) الذي يدعى أليس ويكس (Alice، Weeks). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل نسيلات إشعاعية. يظهر المعدن

لونًا أصفرًا (شكل ٣-١١د). البريق شمعي إلى حريري والمخدش أصفر. تتراوح صلادة المعدن بين ١ و ٢، ويصل الوزن النوعي إلى ٤,١ جم/سم^{3}. الانفصام جيد بالمستوى [hk0]. يوجد المعدن بعروق الأوبال (Opal) بصخور الرايوليت مصاحباً لمعادن الكربونات، والجبس، ومعادن اليورانيوم الثانوية الأخرى. من مناطق وجوده المعروفة: خزان هايوي (Haiwee reservoir) بجبال كوزو (Coso Mountains)، منطقة مارجاريتيس (Margaritas) بالمكسيك، منطقة لي بويس-نويرس (Le Bois-Noirs) بفرنسا، وأفغانستان، واليابان، واستراليا.

٥- مجموعة معادن فانيدات اليورانيوم
Uranium Vanadates

تضم هذه المجموعة معظم معادن اليورانيوم غير القابلة للذوبان (Langmuir, 1978). تعتبر معادن فانيدات اليورانيوم من المعادن المستقرة التي تتكون عندما يلتقي اليورانيوم المذاب بمحاليل غنية بأيونات الفانيديوم. تنتج معادن فانيدات اليورانيوم من أكسدة معادن اليورانيوم الأولية (U^{4+})، ومعادن الفانيديوم (مثل المونتروسيت Montroseite)، كما يمكن أن تشتق معادن فانيدات اليورانيوم من صخور غنية بالفانيديوم المختزل، مثل صخور الطفلة الغنية بالمواد العضوية، والصخور الأخرى الغنية بالمعادن الطينية. تستطيع المواد العضوية والمعادن الطينية ادمصاص اليورانيوم، والفانيديوم من المحاليل، مكونةً معادن فانيدات اليورانيوم الثانوية.

تضم هذه المجموعة العديد من معادن فانيدات اليورانيوم، منها: الكارنوتيت (Carnotite)، والراوفايت (rauvite)، والتيامونيت (tyuyamunite)، والميتا-تيامونيت (meta-tyuyamunite)، واليوفانيت (uvanite)، والفرانسفيلليت (francevillite)، والسينجيريت (sengierite)، والفانيوراليت (vanuralite). تعتبر معادن الكارنوتيت والتيامونيت والميتا-تيامونيت من أهم معادن اليورانيوم

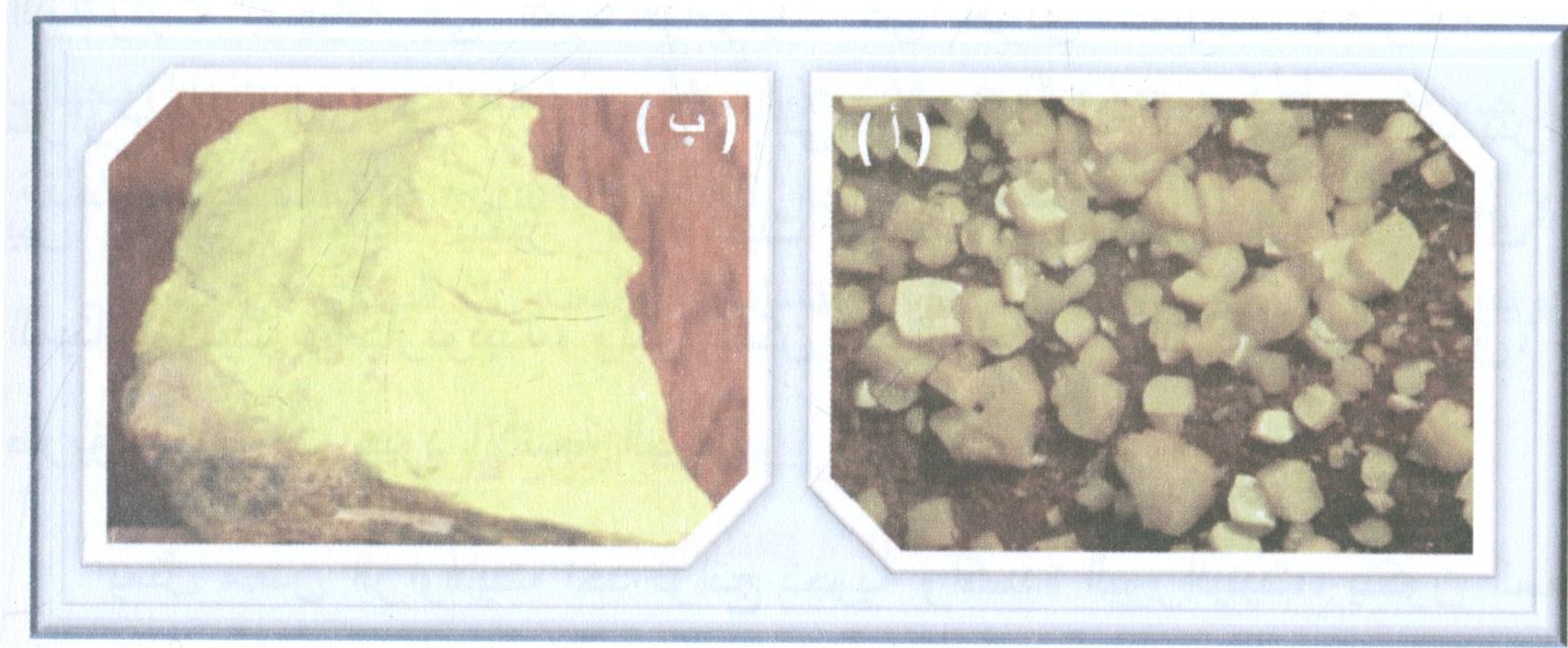
بتلك المجموعة. تتميز المعادن الثلاثة بثبات حالة اليورانيوم منذ تكونها. يمثل التيامونيت النوع الغني بالكالسيوم المكافئ للكارنوتيت، حيث يتشابه المعدنان في المظهر الخارجي، ولكن يميل التيامونيت إلى الاخضرار في اللون. يتحول التيامونيت بسهولة إلى الميتا–تيامونيت عن طريق عمليات لاهدرجة، حيث تتراوح نسبة المياه في الأخير بين ٣ إلى ٥٪، بينما في التيامونيت فإنها تتراوح بين ٨ إلى ١٠٪. يتميز التيامونيت بمعاملات انكسار أقل من تلك في الميتاتيامونيت والكارنوتيت، ولكن يمكن تمييز المعادن الثلاث بشكل دقيق، عن طريق اختبارات حيود الأشعة السينية.

يمثل معدن الراوفايت أحد نواتج تجوية وأكسدة اليورانينيت. يتكون المعدن من فانيدات اليورانيوم والكالسيوم المائية، ويتميز باللون الوردي إلى البني المصفر. ليس للراوفايت أهمية كبيرة كخام لليورانيوم، ويرجع ذلك إلى وجوده بكميات محدودة. يشبه معدن اليوفانيت معدن الراوفايت في اللون والعديد من الصفات الفيزيائية. تعتبر جميع معادن مجموعة فانيدات اليورانيوم معادن ثانوية. تحتوي معادن الفرانسفيلليت، والسينجيريت، والفانيورااليت، على الباريوم، والرصاص، والنحاس، والألومنيوم، على التوالي.

كارنوتيت Carnotite $K_2(UO_2)_2V_2O_8 .1\text{-}3\ H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٩٩م، نسبةً إلى مهندس مناجم يدعى ماري–أدولف كارنوت (Marie-Adolphe Carnot). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد. يوجد على شكل قشور، أو كتل ترابية، أو على شكل تجمعات متورقة. اللون أصفر لامع (شكل ٣–١٢). البريق لؤلؤي قاتم، أو ترابي. البلورات نصف شفافة إلى معتمة. الانفصام جيد وتام في اتجاه واحد. المكسر غير مستوي. الصلادة = ٢، والوزن النوعي = ٤–٥.

يوجد المعدن بصخور الحجر الرملي، والحجر الجيري مع صحبة من معادن اليورانيوم والفانيديوم الأخرى. يوجد المعدن بمناطق عديدة بالولايات المتحدة الأمريكية، مثل كولورادو، ويوتا ونيومكسيكو، وبينسيلفانيا.



شكل ٣-١٢: (أ) كارنوتيت من منجم أنديرسون بولاية أريزونا بالولايات المتحدة الأمريكية. (ب) عينة يدوية صفراء اللون لمعدن الكارنوتيت (www.ne.jp/.../mineral/photo/carnotite.jpg).

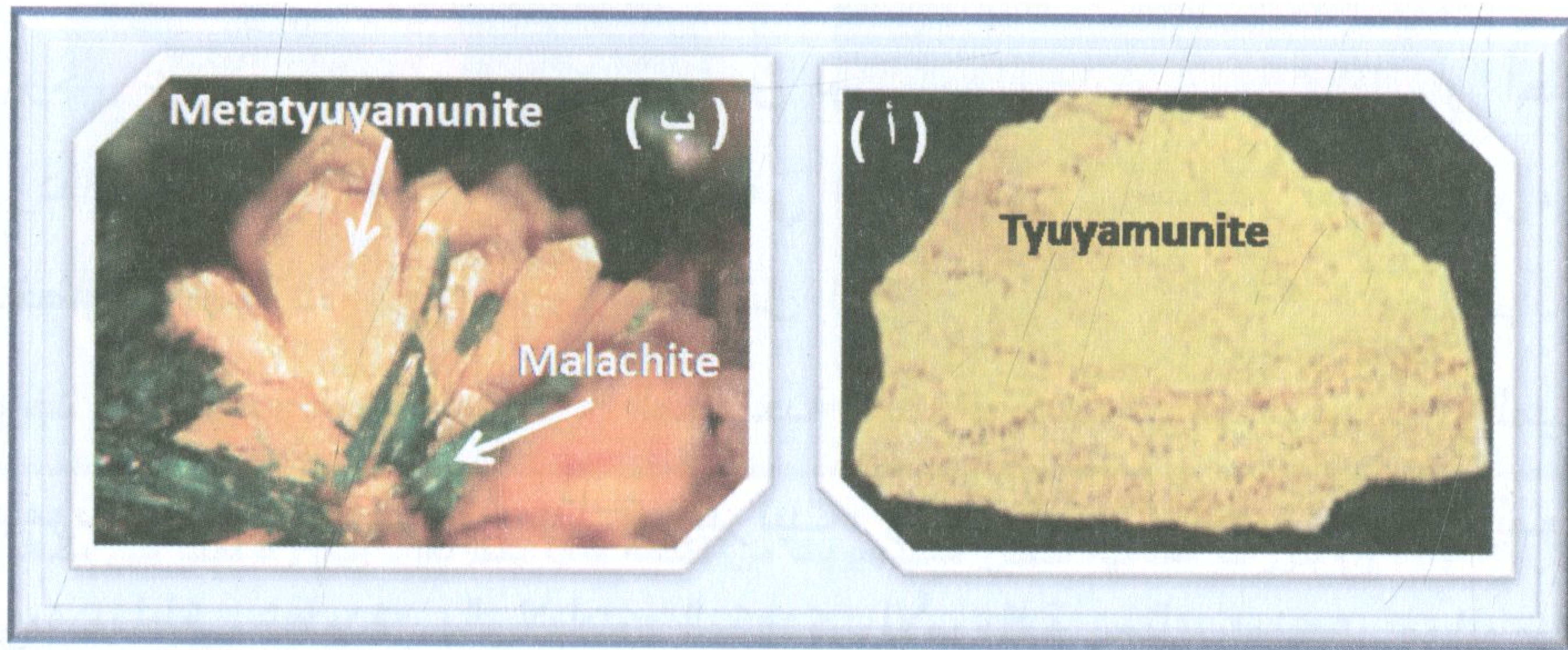
تيامونيت Tyuyamunite $Ca(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 5\text{-}8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩١٢م، ويرجع الاسم إلى المكان الذي أكتشف فيه المعدن. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل قشري، أو نصلي، أو كتلي، أو تجمعات شعاعية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا كناريًا، أو أصفرًا ليمونيًا إلى أصفر مخضر (شكل ٣-١٣أ). البريق لؤلؤي إلى صمغي، والمخدش أصفر فاتح. تتراوح صلادة المعدن بين ١,٥ و ٢، ويصل الوزن النوعي إلى ٣,٦ جم/سم^{٣}. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، ومميز بالمستوى [010] و[100]. يوجد المعدن بنطق وجود معدن الكارنوتيت، ويصاحبه معادن أخرى، مثل: الملاكيت، والكالسيت، والباريت، ومعادن حاوية على الفانيديوم. يوجد المعدن بمناطق عديدة غرب الولايات المتحدة الأمريكية، مثل:

وادي بارادوكس (Paradox Valley)، ومونتروز (Montrose Co.)، وتومبسون جراند (Thompson's Grand).

ميتا-تيامونيت Metatyuyamunite $Ca(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 3(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٠م، ويرجع الاسم إلى علاقته بمعدن التيامونيت، حيث يمثل الصنف الأقل هدرجة. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل صفائحي، أو كتلي، أو تجمعات شعاعية. يظهر المعدن لونًا أصفرًا كناريًا، أصفرًا مخضرًا أو برتقاليًا (شكل ٣-١٣ب). البريق صمغي، والمخدش أصفر فاتح. تصل صلادة المعدن إلى ٢، والوزن النوعي إلى ٣,٨٤ جم/سم^3. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، ومميز بالمستوى [101] و [100]. يوجد المعدن مختلطاً مع معدن الكارنوتيت، والتيامونيت، والميتا-تيامونيت، والملاكيت. يوجد المعدن في ما يزيد عن خمسة وثلاثين موقعاً بهضبة كولورادو، مثل منجم جو داندي Jo Dandy ومونتروز (Montrose Co.)، ومايداي (Mayday)، كما يوجد بمنجم ماشامبا (Mashamba West) بالكونغو.



شكل ٣-١٣: (أ) تيامونيت برتقالي اللون (Photographs Robert W. Jones). (ب) ميتا-تايومونيت برتقالي اللون على ملاكيت من منجم ماشامبا (Mashamba West) بالكونغو.

سينجيريت Sengierite $Cu_2(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 6(H_2O)$

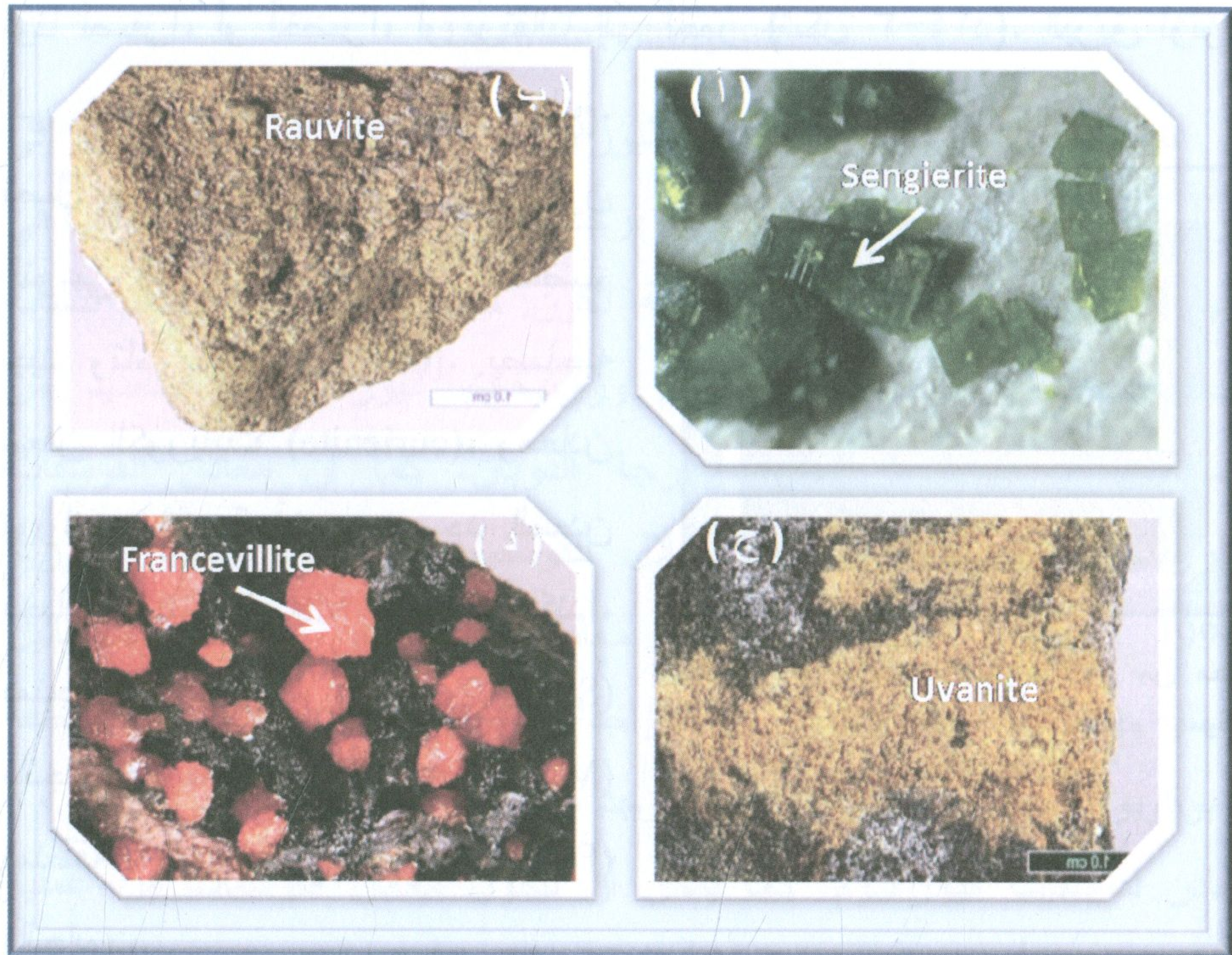
تم التعرف على المعدن عام ١٩٤٩م، ويرجع الاسم إلى العالم إيدجار سينجير (Edgar Sengier). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، ويوجد على شكل منشوري، أو عمداني. يظهر المعدن لونًا أخضرًا أو أخضرًا مصفرًا (شكل ٣-١٤أ). البريق زجاجي، والمخدش أخضر فاتح. تصل صلادة المعدن إلى ٢,٥، والوزن النوعي إلى ٤,٠٥ جم/سم^3. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. من المعادن المصاحبة الملاكيت، والكريزوكولا (chrysocolla)، والفاندينبرانديت (vandenbrandeite)، والفولبورثيت (volborthite). من مناطق وجوده المعروفة: منجم هيوميل (Huemul) بالأرجنتين، ومنجم روزميتال (Rozmital) بجمهورية التشيك، ومنجم شينكولوبوي بالكونغو، ومنجم رابيجاس بفرنسا، ومنجم كلارا (Calara) بألمانيا، ومنجم كولي (Cole) بأمريكا.

راوفايت Rauvite $Ca(UO_2)_2V^{5+}{}_{10}O_{28} \cdot 16(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٢م، ويرجع الاسم إلى تركيبه الكيميائي من الراديوم، واليورانيوم، والفانيديوم. المعدن غير متبلور (amorphous)، ويوجد على شكل كتلي. يظهر المعدن لونًا أحمرًا بنيًا، أو برتقاليًا، أو أحمرًا ورديًا (شكل ٣-١٤ب). البريق صمغي إلى شمعي، والمخدش بني مصفر، أو مخضر. الصلادة غير معروفة، ويصل الوزن النوعي إلى ٢,٩٢ جم/سم^3. لا يوجد انفصام. من المعادن المصاحبة الكارنوتيت، والتيامونيت، والميتا-تيامونيت، واليوفانيت، والميتا-توربيرنيت، والهاويتيت، والجبس. يوجد المعدن في مناطق عديدة بالولايات المتحدة الأمريكية مثل منجم مونيومينت (Monument 1) بأريزونا، ومنجم هامر (Hummer) بكلورادو، ومنجم هوت بوينت (Hot Point) بداكوتا الجنوبية.

يوفانيت Uvanite $U_2V_6O_{21}·15H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩١٤م، ويرجع الاسم إلى تركيبه الكيميائي من اليورانيوم والفانيديوم. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل حبيبات ناقصة إلى كاملة الأوجه. يظهر المعدن لونًا أصفرًا بنيًا (شكل ٣-١٤ج). البريق صمغي إلى شمعي، والمخدش بني مصفر إلى أخضر زيتوني. الصلادة والوزن النوعي غير معلومين. الانفصام جيد. من المعادن المصاحبة:

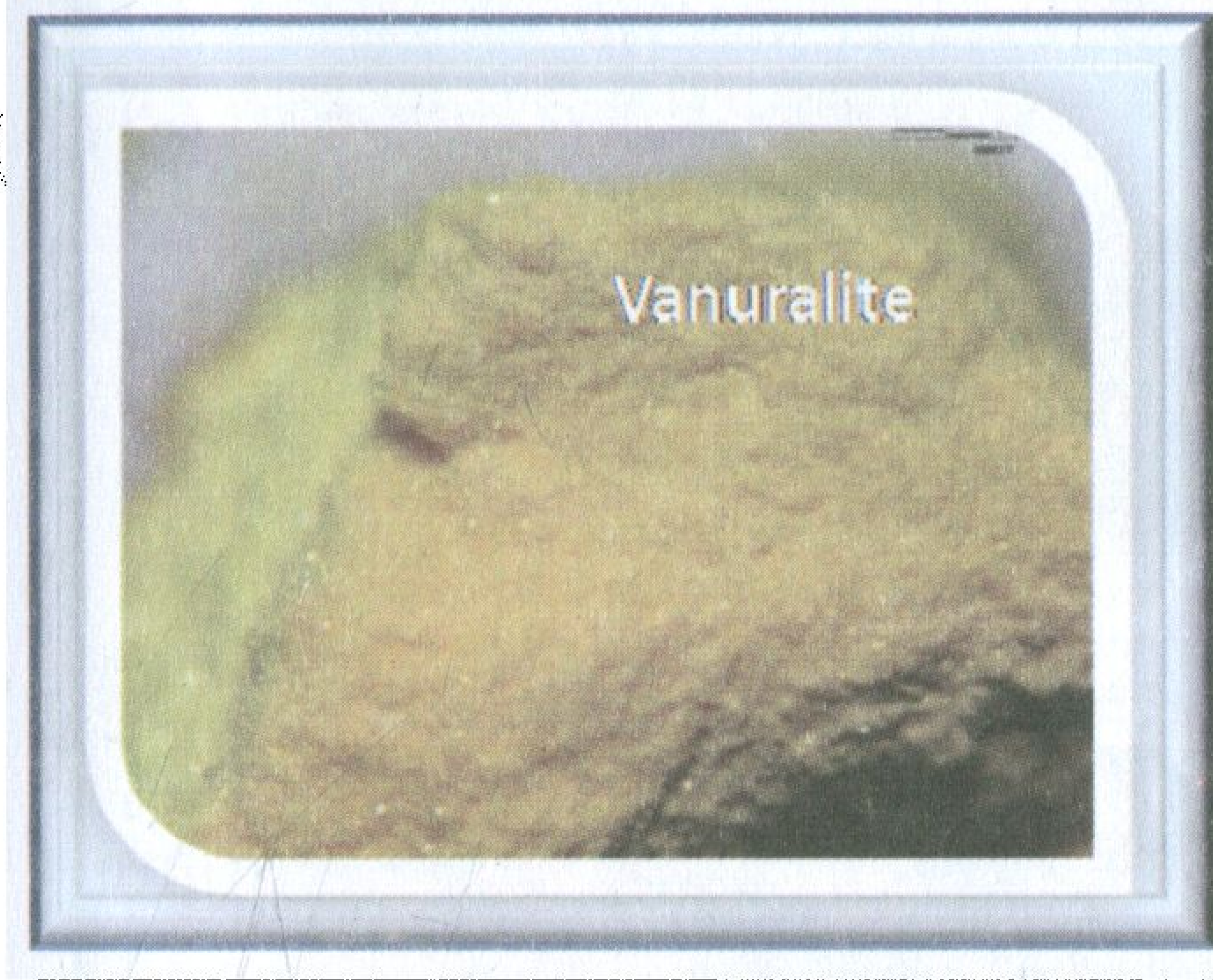


شكل ٣-١٤: (أ) بلورات عمدانية لمعدن السينجيريت من منطقة شابا بالكونغو. (ب) راوفايت بني مصفر بالحجر الرملي من منطقة مونيومنت فاللي Monument Valley بولاية أريزونا بأمريكا. (ج) يوفانيت بني مصفر بالحجر الرملي من منطقة تيمبيل روك Temple Rock بولاية أريزونا بأمريكا. (د) بلورات برتقالية إلى حمراء اللون لمعدن الفرانسيفيلليت من منجم مونانا بالجابون.

الراوفايت، والكارنوتيت، والميتا-توربيرنيت، والهاويتيت، والجبس. من مناطق وجوده المعروفة: منجم كاجونكيلو (Cajoncillo) بالأرجنتين، ومنجم مونيومينت (Monument 1) بأريزونا، ومقاطعة جرانتز (Grants) بنيومكسيكو.

فرانسفيلليت Francevillite $(Ba,Pb)(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 5(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٧٥م، ويرجع الاسم إلى مكان وجوده. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، ويوجد على شكل صفائحي. يظهر المعدن لونًا أصفرًا، أو أخضرًا، أو برتقاليًا إلى أحمر (شكل ٣-١٤د). البريق لؤلؤي إلى صمغي، والمخدش أصفر فاتح.



شكل ٣-١٥: حبيبات صفراء اللون من معدن الفانيوراليت من منجم مونانا Mounana بالجابون.

تصل صلادة المعدن إلى ٣، والوزن النوعي إلى ٤,٥٥ جم/سم^3. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. يصاحبه معدن الكورينيت (curienite)، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. يوجد المعدن بجبال أوتيش (Otish Mts.) بكندا، بمنجم جنوب تيراس (South Terras) بانجلترا، وبمنجم مونانا (Mounana) بمنطقة فرانسفيللي (Franceville) بالجابون.

فانيوراليت Vanuralite $(H_3O,Pb,K,Ca)_2(UO_2)_2V_2O_8.4H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٥م، ويرجع الاسم إلى تركيبه. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، ويوجد على شكل حبيبات دقيقة، أو صفائحي، أو

سداسي كاذب. يظهر المعدن لونًا أصفرًا ليمونيًا (شكل ٣-١٥). البريق زجاجي، والمخدش أصفر فاتح. تصل صلادة المعدن إلى ٢، والوزن النوعي إلى ٣,٦٢ جم/سم٣. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. يصاحبه معدن اليورانوفان، والصوديت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. يوجد المعدن بنطاق الأكسدة بالحجر الرملي بروسيا.

٦- مجموعة معادن فوسفات اليورانيوم

Uranium Phosphates

تضم مجموعة معادن فوسفات اليورانيوم العديد من المعادن، تصل إلى حوالي ٧٠ نوعًا تم وصفها حتى الآن. يرجع ذلك إلى وفرة الفوسفات الذائب في المياه الجوفية، وبالتالي زيادة فرصة تكون معادن هذه المجموعة. تتشابه مجموعتا معادن فوسفات اليورانيوم وزرنيخات اليورانيوم في العديد من الصفات الفيزيائية، مثل ضعف درجة الذوبان. كما أن معادن الفوسفات والزرنيخات تظهر نوعًا من الإحلال للفوسفور والزرنيخ ببنيتها البلورية (Burns, 1999)، ويمكن أن ينشأ بين معادن المجموعتين ما يسمى بالمحاليل الصلبة (solid solutions). من التواجدات الهامة لمعادن الفوسفات منطقة كوبوكوبو بجمهورية الكونجو، حيث يوجد بصخور البيجماتيت ما يزيد عن ١٠ معادن لفوسفات اليورانيوم. كما يمكن أن تتكون معادن الفوسفات من عملية إحلال لمعادن أخرى، مثل إحلال الأوتونيت محل الأباتيت (Abd El-Naby and Dawood, 2008). تلعب الكائنات الحية دوراً هاماً في ترسيب فوسفات اليورانيوم كيميائياً، حيث ثبت معملياً أن وجود اليورانيوم مع الفوسفات العضوي وحده، لا ينتج عنه ترسب ملموس لليورانيوم.

تعتبر مجموعة معادن فوسفات اليورانيوم من أكبر مجاميع معادن اليورانيوم، حيث تمميز بأن جميع معادنها ثانوية النشأة، وذات بنية صفائحية. ومن أمثلة معادن فوسفات اليورانيوم: الأوتونيت (autunite)، والميتا-أوتونيت (meta-autunite)، والتوربيرنيت (torbernite)، والميتا-توربيرنيت (metatorbernite)، والرينارديت (renardite)، واليورانوسيرسيت (urano-circite)، والميتا يورانوسيرسيت (meta-uranocircite)، والميتا-أنكوليت (meta-ankoleite)، والسيلييت (saleeite)، والبازيتيت (bassetite)، والبرزهيفالسكيت (przhevalskite)، والسابوجاليت (sabugalite)، والبيرجينيت (bergenite)، والدومونتيت (dumontite)، والفوسفورانيليت (phosphuranylite)، والنينجيويت (ningyoite)، والديوندتيت (dewindtite)، والكوكونينويت (coconinoite)، والبارسونيت (parsonite). يعتبر معدني الأوتونيت والتوربينيت وأشكالهما الأخرى من ميتا-أوتونيت وميتا-توربيرنيت من أكثر معادن هذه المجموعة شيوعاً، حيث توجد هذه المعادن كمالئة للكسور والفجوات أو بلورات دقيقة تغطي جدران الفواصل.

أوتونيت Autunite $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2.10H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٥٢م، نسبة إلى مكان اكتشافه بمنطقة أوتون (Autun) بفرنسا. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، ويوجد على شكل بلورات عمدانية، أو صفائحية (شكل ٣-١٦أ). اللون أصفر، وأصفر مخضر إلى أخضر مصفر. البريق زجاجي إلى لؤلؤي (pearly) .المخدش أصفر شاحب. الصلادة = ٢-٢,٥، والوزن النوعي = ٣,١-٣,٢. من المعادن المصاحبة: توربيرنيت، وميتا-توربيرنيت، ويورانوسيرسيت، ويورانوفان، ويورانينيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من أشهر أماكن وجوده منطقة

أوتون بفرنسا، ومنطقة كورنوال (Cornwall) بانجلترا، ومنطقة ميتشيل (Mitchell Co.) بكارولينا الشمالية، ومنطقة سبوكان (Mt.Spokan) بأمريكا، وأيضاً في الكونغو، وألمانيا، والبرتغال. كما يوجد المعدن بمناطق القص بالصخور الجرانيتية بمنطقة سيلة، جنوب الصحراء الشرقية، مصر.

ميتا-أوتونيت Meta-autunite $Ca(UO_2)_2[PO_4]_2\cdot 6\text{-}8H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٣٨م، نسبة إلى معدن الأوتونيت حيث يمثل الصنف الأقل هدرجة. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، ويوجد على شكل بلورات عمدانية، أو صفائحية (شكل ٣-١٦ب). اللون أصفر، وأصفر مخضر إلى أخضر مصفر. البريق لؤلؤي، والمخدش أصفر شاحب. الصلادة=٢-٢,٥، والوزن النوعي = ٣,٤٥-٣,٥٥. يتشابه المعدن من حيث المعادن المصاحبة، وأماكن وجوده مع تلك لمعدن الأوتونيت.



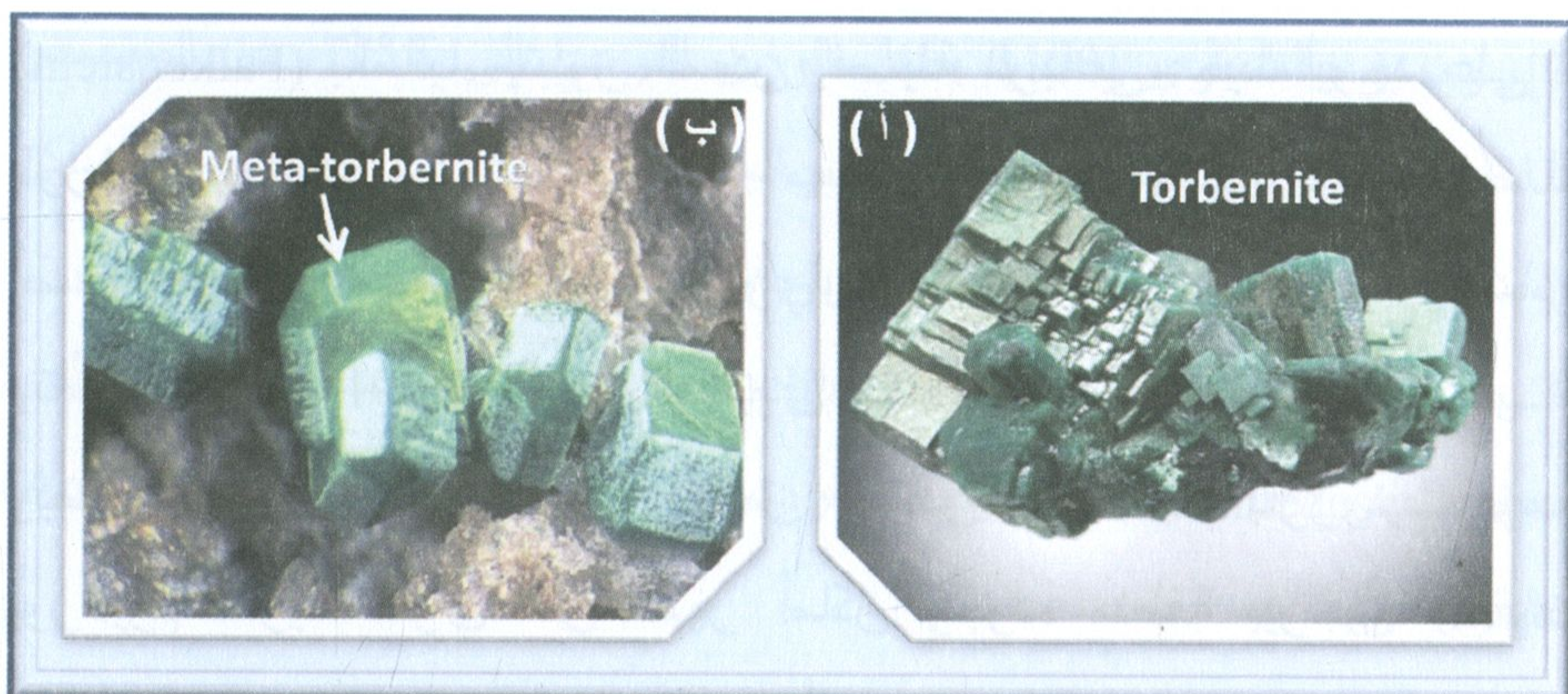
شكل ٣-١٦: (أ) بلورات صفائحية خضراء ومصفرة اللون لمعدن الأوتونيت من منجم مارجناك Margnac بفرنسا. (ب) بلورات عمدانية للميتا-أوتونيت من منجم ليس أودوتس Les Oudots بفرنسا.

توربيرنيت Torbernite $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2$-$10H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٧٩٣م، نسبةً إلى الكيميائي السويدي توربيرن بيرجمان (Torben Bergmann). يتبلور المعدن في فصيلة الرباعي. يوجد على شكل بلورات عمدانية أو منشورية (شكل ٣-١٧أ)، تبدو البلورات عادةً على شكل مكعبي، كما يوجد المعدن على شكل قشور، أو حبيبات، أو صفائح. اللون أخضر، والبريق لؤلؤي. الانفصام جيد وتام في اتجاه واحد [001]. الصلادة = ٢-٢,٥، والوزن النوعي = ٣,٢. المخدش أخضر شاحب. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وأوتونيت، ويورانوفان، ويورانوسيرسيت، وميتا-توربيرنيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من أماكن وجوده: منطقة كورنوال بانجلترا، ومنطقة ميتشيل بكارولينا الشمالية، ويوتا بالولايات المتحدة الأمريكية، وشابا بالكونغو، وأيضاً في ألمانيا، وفرنسا.

ميتا-توربيرنيت Meta-torbernite $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩١٦م، نسبة إلى معدن التوربيرنيت حيث يمثل الصنف الأقل هدرجة. يتبلور المعدن في فصيلة الرباعي. يوجد على شكل بلورات عمدانية، أو منشورية ، تبدو البلورات عادةً على شكل مكعبي (شكل ٣-١٧ب)، كما يوجد المعدن على شكل قشور، أو حبيبات، أو صفائح. اللون أخضر غامق إلى أخضر فاتح، والبريق زجاجي إلى صمغي. الانفصام جيد وتام في اتجاه واحد [001]. الصلادة = ٢,٥، والوزن النوعي = ٣,٧٥. المخدش أخضر شاحب. يتشابه المعدن من حيث المعادن المصاحبة، وأماكن وجوده مع معدن التوربيرنيت.



شكل ٣-١٧: (أ) بلورات عمدانية ومنشورية لمعدن التوربيرنيت من منجم مارجابال **Margabal** بفرنسا. (ب) بلورات مكعبية للميتا-توربيرنيت من منجم ويبل بازيت **Wheal Basset** بإنجلترا.

رينارديت Renardite $Pb(UO_2)_4(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 7(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٨م، نسبة إلى أحد علماء علم المعادن ببلجيكا والذي يدعى ألفونس رينارد (Alphonse Renard). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، حيث يوجد على شكل بلورات عمدانية، أو ليفية، أو قشرية (شكل ٣-١٨أ). اللون أصفر، وأصفر مخضر إلى بني مصفر. البريق زجاجي إلى صمغي، والمخدش أصفر شاحب. الصلادة= ٣,٥، والوزن النوعي=٤,٣٤. من المعادن المصاحبة: توربيرنيت، وميتا-توربيرنيت، ويورانوفان، وأوتونيت، وبيكويرليت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. يندر وجود المعدن، ومن أشهر أماكن وجوده: منطقة جروري (Grury) بفرنسا.

يورانوسيرسيت Uranocircite $Ba(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٧م، نسبة إلى تركيبه الكيميائي، وإلى الكلمة اليونانية فالكون (Falcon) والتي تعني مكان اكتشافه بمنطقة فالكينشتاين

(Falkenstein) بألمانيا. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، حيث يوجد على شكل بلورات عمدانية، أو صفائحية تشبه معدن الأوتونيت (شكل ٣-١٨ب). اللون أصفر أو أصفر مخضر. البريق لؤلؤي، والمخدش أصفر شاحب. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، ومميز بالمستوى [100]. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٢,٥، ويصل الوزن النوعي إلى ٣,٤٦. من المعادن المصاحبة: بارزونيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من أشهر أماكن وجوده منطقة بيرجين (Bergen)، وفالكينشتاين، ويلسيندورف، وبافاريا بألمانيا، منطقة روزمانيرا (Rosmaneira) بأسبانيا، منطقة سردنيا (Srdnia) بالمجر، ومنجم مونانا (Mounana) بالجابون.



شكل ٣-١٨: (أ) بلورات من معدن الرينارديت من منجم جراري Grury بفرنسا. (ب) بلورات صفائحية لمعدن يورانوسيرسيت، مجوى جزئيًا إلى ميتا-يورانوسيرسيت من منطقة بيرجين Bergen بألمانيا.

ميتا-يورانوسيرسيت Meta-uranocircite $Ba(UO_2)_2(PO_4)_2{\cdot}6(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٨٢م، نسبةً إلى معدن اليورانوسيرسيت، حيث يمثل الصنف الأقل هدرجة. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، ويوجد على شكل بلورات صفائحية، أو تجمعات شبه متوازية. اللون أصفر أو أصفر ليموني. البريق لؤلؤي، والمخدش أصفر شاحب. الانفصام جيد وتام بالمستوى

[001]، ومميز بالمستوى [100]. يصل الوزن النوعي إلى ٣,٩٦. من المعادن المصاحبة: يورانوسيريسيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من أشهر أماكن وجوده: منطقة بريطاني (Brittany) بفرنسا، منجم مونانا (Mounana) بالجابون، منطقتي هويباختال (Heubachtal)، وشميديستولينهالدي (Schmiedestollenhalde) بألمانيا، وبالقرب من منطقة أنتسيتابي (Antsitabe) بمدغشقر.

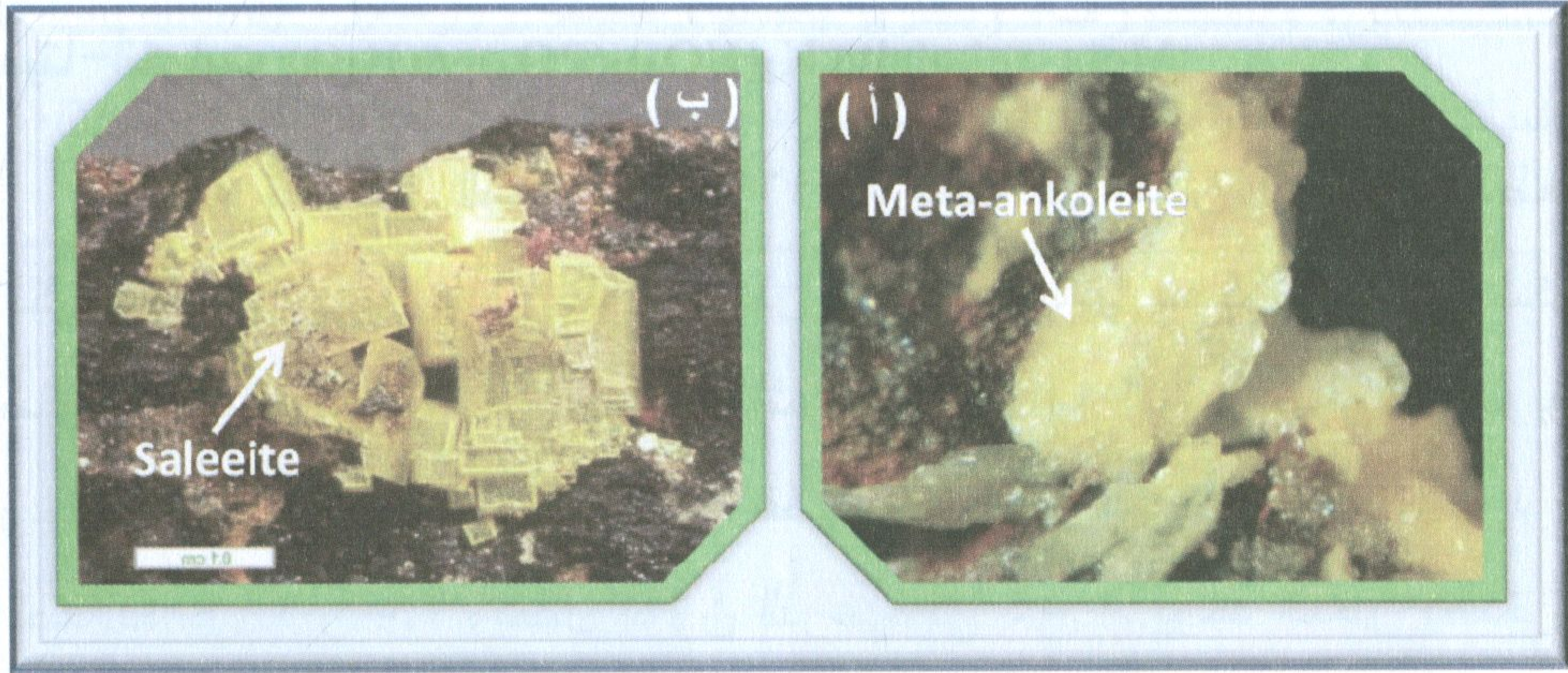
ميتا-أنكوليت Meta-ankoleite $K_2(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 6(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٦م، نسبة إلى مكان اكتشافه بمقاطعة أنكولي (Ankole) بأوغندا. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي حيث يوجد على شكل صفائح تصل إلى واحد ميليميتر (شكل ٣-١٩أ). اللون أصفر، والبريق زجاجي، والمخدش أصفر شاحب. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٢,٥ ويصل الوزن النوعي إلى ٣,٥٤. يوجد المعدن بصخور البيجماتيت الحاملة للبيريل بمقاطعة أنكولي بأوغندا، ومعه صحبة من المسكوفيت والكوارتز، كما يوجد المعدن بمقاطعة سيبانجيف (Sebungive) بزيمبابوي، مع صحبة من الميكروكلين بصخور الحجر الرملي.

سيلييت Saleeite $Mg(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10(H_2O)$

يرجع اسم المعدن إلى عالم علم المعادن البلجيكي أشيلي سالي (Achille Salée) (١٨٨٣-١٩٣٢م). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، حيث يوجد على شكل عمداني، أو حبيبات مستطيلة مسطحة (شكل ٣-١٩ب). اللون أصفر، أو أصفر مخضر إلى أخضر زيتوني. البريق زجاجي، والمخدش أبيض مصفر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، ومميز بالمستوى [010] و [110]. تصل

الصلادة إلى ٢,٥، والوزن النوعي إلى ٣,٢٧. يوجد المعدن مع صحبة من اليورانوفان، والزوينيريت (Zeunerite)، بمنطقة شنيبيرج (Schneeberg) بألمانيا، كما يوجد بمنجم شينكولوبوي بالكونغو، مع صحبة من التوربيرنيت، والديويندايت، وبمنطقة رام جانجل (Rum Jungle) باستراليا، ومنطقة لافرا دو إنيو (Lavra do Enio) بالبرازيل، ومنطقة اليجاتور ريفير (Aligator River) باستراليا.



شكل ٣-١٩: (أ) ميتا-أنكوليت من منجم أركيو ليناربو Arcu su Linnarbu، بإيطاليا. (ب) سيلييت من منطقة أليجاتور ريفير باستراليا. (www.excaliburmineral.com/cdintro/saleeite.htm)

بازيتيت Bassetite $Fe^{2+}(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩١٥م، ويرجع اسمه إلى مكان التعرف عليه بمنجم وييل بازيت (Wheel Basset) بأنجلترا. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، حيث توجد البلورات على شكل إبري، أو نصلي (شكل ٣-٢٠). اللون أصفر بني، برونزي، بني مخضر إلى أخضر زيتوني. البريق زجاجي، والمخدش أبيض مخضر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]. تصل الصلادة إلى ٢,٥، والوزن النوعي إلى ٣,٦٣. يوجد المعدن مع صحبة من

اليورانوسباسيت (uranospathite)، والتوربيرنيت بعروق اليورانينيت، والبيريت بمنجم وييل بازيت بانجلترا، كما يوجد بمنجم فيومرول (Fuemrol)، ومنجم دينيس (Denise)، ومنجم لاكروزيللي (LaCrouzille) بفرنسا.



شكل ٣-٢٠: بلورات نصلية من البازيتيت من منجم Capoterra كابوتيرا بإيطاليا.

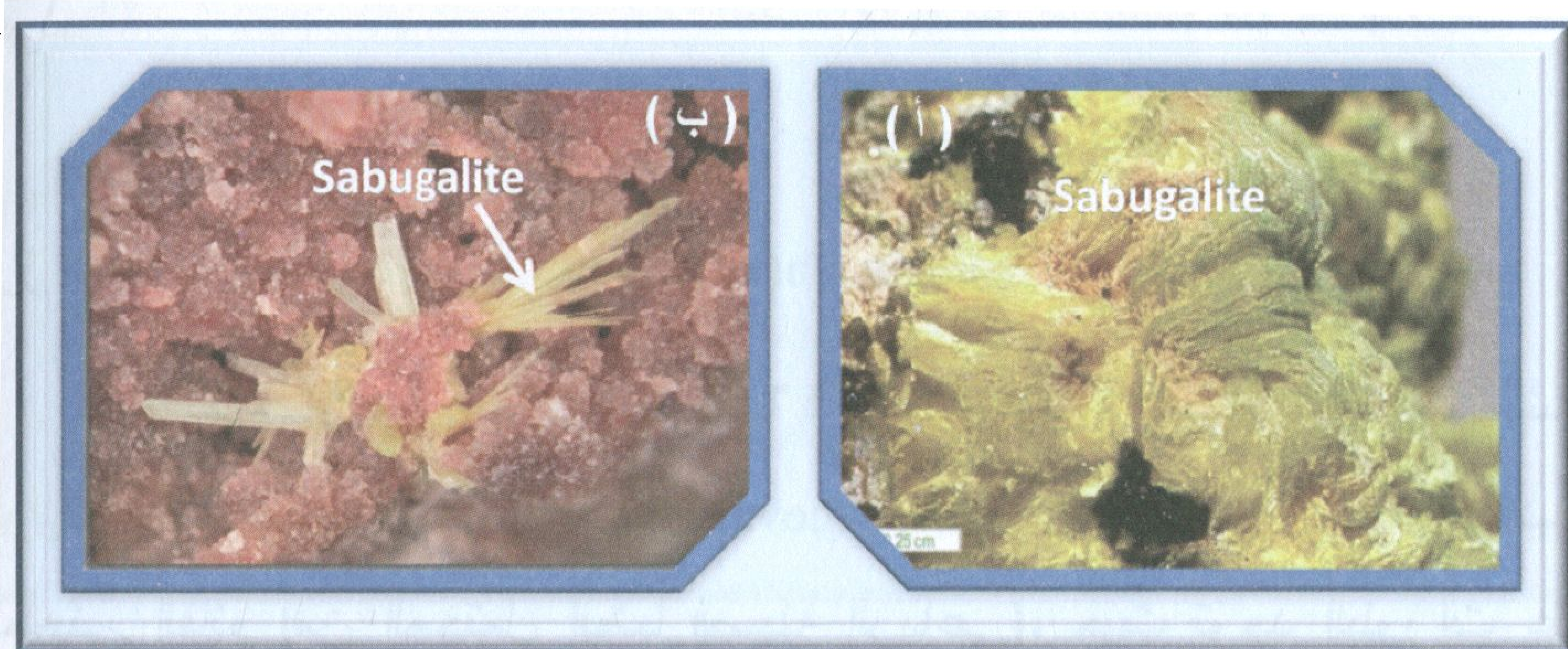
برزهيفالسكيت Przhevalskite $Pb(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 4(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٤٦م، ويرجع اسمه إلى المستكشف الروسي نيكولي برزهيفالسكي (Nikolai Przhevalsky). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم (من المحتمل أيضاً فصيلة الرباعي)، حيث توجد البلورات على شكل تجمعات صفائحية أو عمدانية. اللون أصفر إلى أصفر مخضر فاتح. البريق صمغي إلى لؤلؤي، والمخدش أصفر فاتح. الانفصام مميز بالمستوى [001]. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٣، ويساوي متوسط الوزن النوعي ٣,٥١. يوجد المعدن مع صحبة من اليورانوسبينيت، والتوربيرنيت، والأوتونيت، وأكاسيد الحديد المهدرجة بنطاق الأكسدة لرواسب البيتشبلند، والكبريتيدات بروسيا.

سابوجاليت Sabugalite $HAl(UO_2)_4(PO_4)_4 \cdot 16(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥١م، ويرجع اسمه إلى مكان اكتشافه بمنطقة سابوجال (Sabugal) بالبرتغال. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي حيث

توجد البلورات على شكل تجمعات صفائحية أو نصلية (شكل ٣-٢١). اللون أصفر فاتح إلى ليموني. البريق زجاجي، والمخدش أبيض مصفر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. تصل الصلادة إلى ٢,٥، ومتوسط الوزن النوعي يساوي ٣,٢. من المعادن المصاحبة: ميتا-أوتونيت، سيلييت وفوسفورانيليت. من أماكن وجوده: منطقة بيدرو ألفارو (Pedro Alvaro) بأسبانيا، ومنجم مارجناك بفرنسا، ومنجم بلاك ووتر (Black Water) بأمريكا، ومنجم الشارانا (Sharana)، وجنوب أليجاتور فاللي (Alligator Valley) باستراليا.



شكل ٣-٢١: (أ) بلورات صفائحية من السابوجاليت من منجم مارجناك بفرنسا. (ب) بلورات نصلية من السابوجاليت من منجم بيل أير Bel Air بفرنسا.

بيرجينيت Bergenite $(Ba, Ca)_2(UO_2)_3(PO_4)_2(OH)_4.5.5H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥١م، ويرجع اسمه إلى مكان اكتشافه بمنطقة بيرجين (Bergen) بألمانيا. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد وتوجد البلورات على شكل إبري (شكل ٣-٢٢أ). اللون أصفر إلى أصفر مخضر. البريق زجاجي، والمخدش أبيض مصفر. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٣، ويبلغ متوسط الوزن النوعي ٤,١. من المعادن المصاحبة: أوتونيت، ويورانوسيرسيت،

وتوربيرنيت، ويويندتيت، ويورانوفان. من أماكن وجوده: منطقة بيرجين، ومنطقة مينيتزينسفاند بالغابات السوداء، ألمانيا.

دومونتيت Dumontite $Pb_2(UO_2)_3O_2(PO_4)_2 \cdot 5(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٤م، وأعطي اسمه تكريماً لأحد الجيولوجيين البلجيكيين يدعى أندري دومونت (André Dumont). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل إبري، أو مستطيل (شكل ٣-٢٢ب). اللون أصفر ذهبي إلى أصفر فاتح. البريق زجاجي والمخدش أصفر فاتح. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٣، ويبلغ متوسط الوزن النوعي ٥,٦٥. من المعادن المصاحبة: أوتونيت، توربيرنيت، كاسوليت ويورانوفان. من أماكن وجوده: صخور البيجماتيت بمنجم شينكولوبوي بالكونغو، ومناجم وايت أوكا (White Oak)، وجرين مونستر (Green Monster)، وديزيرت فاللي (Desert Valley) بالولايات المتحدة الأمريكية، منجم رينجير (Ranger) باستراليا.

فوسفورانيليت Phosphuranylite $KCa(H_3O)_3(UO_2)_7(PO_4)_4O_4 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٩م، ويرجع اسمه إلى محتواه الكيميائي من الفوسفور، واليورانيوم. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل منشوري، أو قشور (شكل ٣-٢٢ج). اللون أصفر ذهبي إلى أصفر غامق، أو ليموني. البريق زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش أصفر فاتح. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، ومتوسط الوزن النوعي ٤,١. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وبيكويرليت، وكوريت، وميتا-أوتونيت، وأوتونيت، وتوربيرنيت، وميتا-توربيرنيت، وسيلييت، وسابوجاليت، وهاوييت،

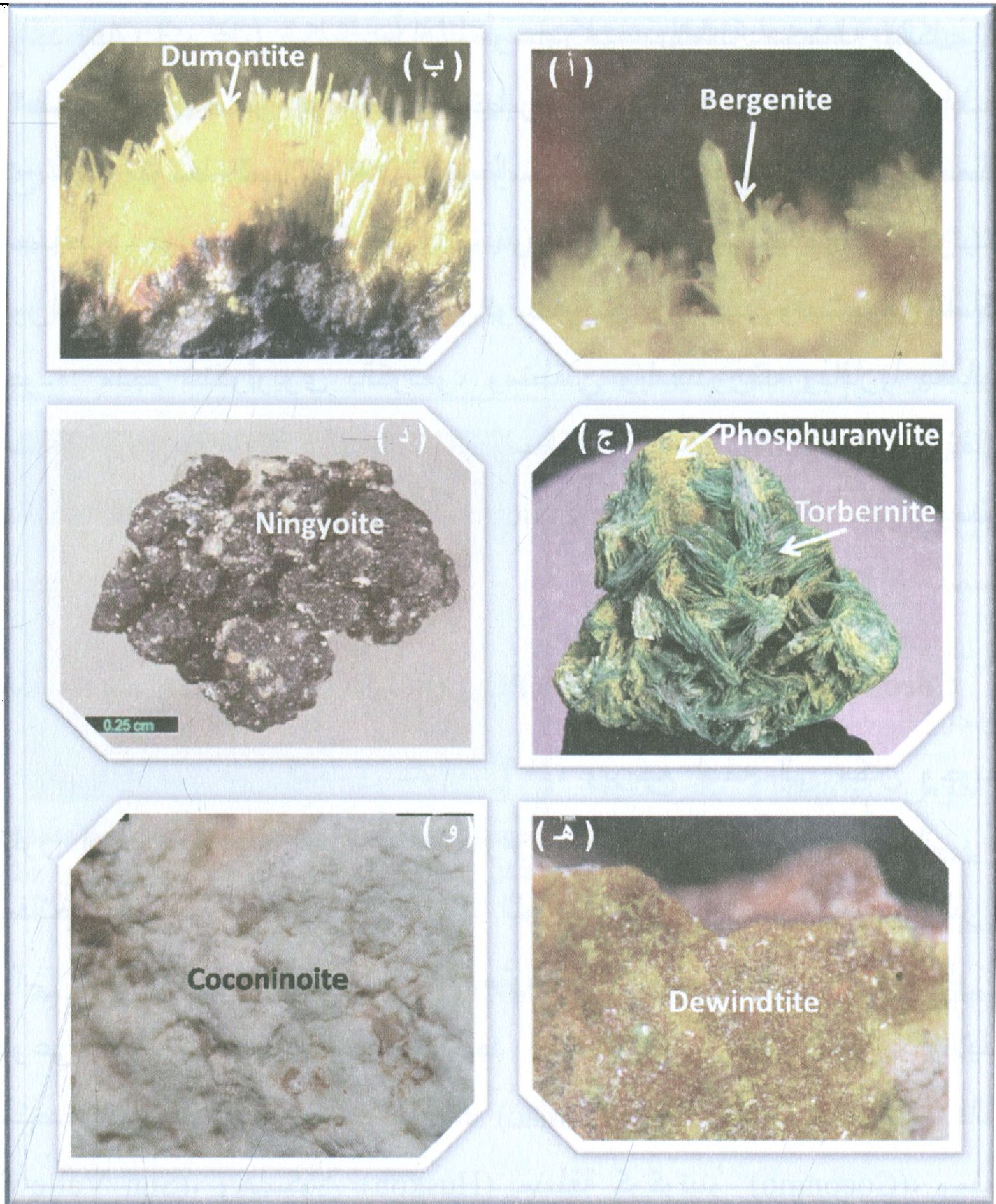
ويورانوفان. من أماكن وجوده: صـــخور البيجماتيـــت بمـــنجم شـــينكولوبوي بالكونغو، في العديد من المناجم بالولايات المتحدة الأمريكية مثـــل فـــلات روك (Flat Rock) وبوخانان (Buchanan)، حيث يوجد المعدن بصخور البجماتيـــت، ومنجم راجيليز (Ruggles) بكارولينا الشمالية، منجم ماجيناك بفرنسا، ومنطقـــة ويلسيندورف وبافاريا بألمانيا، منطقة سابوجال (Sabugal) بالبرتغال، ومنطقـــة فاتوفوري (Vatovory) بمدغشقر، والعديد من الأماكن باستراليا مثل منجم ساديل ريدج (Saddle Ridge)، وبمنطقة اليجاتور فاللي.

نينجيويت Ningyoite $(U,Ca,Ce)_2(PO_4)_2\cdot1\text{-}2H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٩م، ويرجع اسمه إلى مكان اكتشافه بمنجم نينجيو باس (Ningyo Pass) باليابان. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل إبري، أو بلورات مستطيلة، وأحياناً تجمعات على شكل نجمة (شكل ٣-٢٢د). اللون بني إلى أخضر بني. البريق زجاجي إلى قاتم والمخدش زيتي. يبلغ متوسط الصلادة ٣,٥، ومتوسط الوزن النوعي ٤,٧٥. من المعادن المصاحبة: بيريت، ومركازيت، وسفاليريت، وأباتيت، وكلوريت، وجبس، وكوارتز، وهيبيرثين، وفلسبار، ومعادن طينية، ويورانينيت، وأوتونيت، وسيليبيت. من أماكن وجوده: صخور الكونجلميرات بمنجم نينجيو باليابان، ورواسب اليورانيوم الغنية بالمادة العضوية بمنطقتي تيي (Tyee) وبليزارد (Blizzard) بكندا، ورواسب اليورانيوم بمنطقتي دزهانتاور ورودنوي (Dzhantuar and Rudnoye) بأوزباكستان (Uzbekistan).

ديوندتيت Dewindtite $[Pb_3H_2(UO_2)_6O_4(PO_4)_4\cdot12H_2O]$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٢م، ويرجع اسمه إلى جيولوجي بلجيكي يدعى جيان دويندت (Jean Dewindt). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم،



شكل ٣-٢٢: (أ) بلورات صفراء من البيرجينيت من منطقة بيرجين بألمانيا (http//tw.strahlen.org/typloc/bergenit.html). (ب) بلورات إبرية من الديمونتيت من منجم شينكولوبوي بالكونغو. (ج) صحبة من التوربيرنيت والفوسفرانيليت (www.mineralman.com). (د) بلورات دقيقة من معدن النينجويت من منجم نينجيو-توجي Ningyo-Toge باليابان. (هـ) ديوندتيت من منجم بويس- نويرس Bois-Noirs بفرنسا. (و) كوكونينويت من منجم جوماس Jomas بولاية يوتا بأمريكا. (www.uraniumminerals.com/UTh/Coconinoite.htm).

وتوجد البلورات على شكل عمداني، أو بلورات مستطيلة مخططة (شكل ٣-٢٢هـ)، اللون أصفر إلى أصفر مخضر. البريق زجاجي، والمخدش أصفر فاتح. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٧٥، ومتوسط الوزن النوعي ٥,٠٣. من المعادن المصاحبة: توربيرنيت، وديمونتيت، ويورانينيت، وبيرجينيت، وأوتونيت، ويورانوسيرسيت، ويورانوفان، ويورانوسفيريت، وويلسيندروفيت. من أماكن وجوده: منجم شنكولوبوي بالكونغو، ومنطقتي ويلسيندورف وبافاريا بألمانيا، ومنطقة لافاي (La Faye) بفرنسا، ومنطقة أوجيري (Urgeiri) بالبرتغال، ومنطقتي تاكوا ولاس إينديكاتور (Takwa and Lac Indicateur) بكندا، ومنجم رينجير (Ranger) باستراليا.

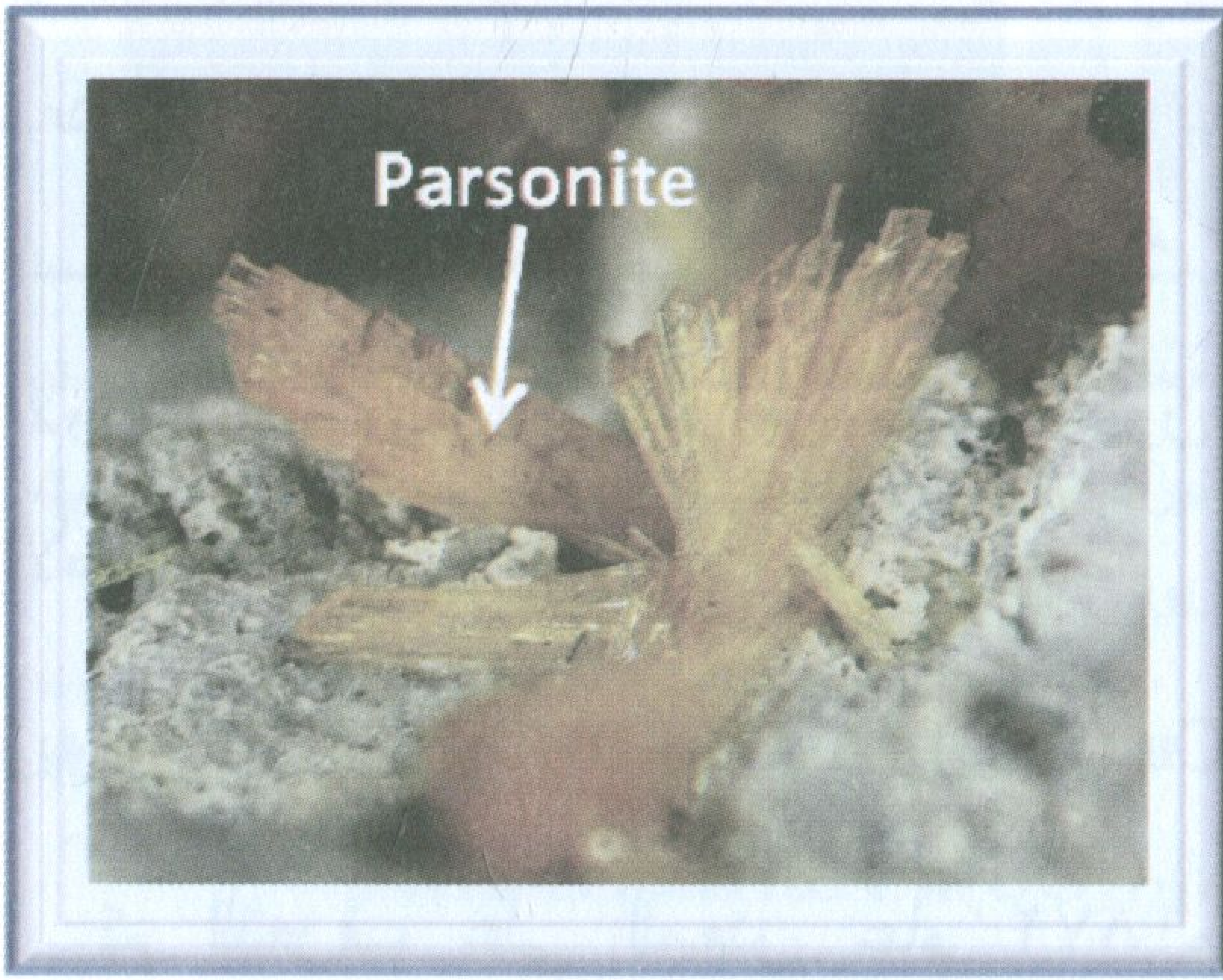
كوكونينويت Coconinoite $[Fe^{3+}{}_2Al_2(UO_2)_2(PO_4)_4(SO_4)(OH)_2 \cdot 18H_2O]$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٦م، ويرجع اسمه إلى مكان وجوده. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل عمداني، أو صفائحي، أو قشرية (شكل ٣-٢٢و). اللون أصفر إلى أصفر كريمي. البريق ترابي قاتم، والمخدش أبيض. يبلغ متوسط الصلادة ١,٥، ومتوسط الوزن النوعي ٢,٧. من أماكن وجوده: يوجد المعدن بالعديد من الأماكن بالولايات المتحدة الأمريكية، مثل: منجم جوماك (Jomac) بولاية يوتا، ومنجم صن فاللي (Sun Valley)، وهاسكون (Huskon) بمنطقة كوكونينو (Coconino)، ومنجم راجليز بنيو هامبشاير (New Hampshire).

بارسونيت Parsonite $[Pb_2(UO_2)(PO_4)_2.2H_2O]$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٩م، ويرجع اسمه إلى عالم علم المعادن الكندي آرثر بارسونس (Arthur Parsons). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد،

وتوجد البلورات على شكل نسيلات مستطيلة أو قشرية (شكل ٣-٢٣). اللون أصفر، أصفر ليموني، بني مخضر إلى وردي شاحب. البريق شبه صمغي والمخدش أصفر شاحب. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٧٥، ومتوسط الوزن النوعي ٥,٧٣. من المعادن المصاحبة: توربيرنيت، وكاسوليت، ودويندتيت، وأوتونيت، وفوسفورانيليت. من أماكن وجوده: يوجد المعدن بنطق الأكسدة لرواسب اليورانيوم الحرمائية، ومنجم شينكولوبوي بالكونغو، ومنطقتي ويلسيندورف وبافاريا بألمانيا، ومنطقة لافاي (La Faye) بفرنسا، ومنجم (Ranger) رينجير باستراليا، ومنطقة تراجوس (Tragos) بالبرتغال، والعديد من الأماكن بالولايات المتحدة الأمريكية، مثل منجم راجليز بنيو هامبشاير (New Hampshire) وبيج ريد (Big Red) بكولورادو.



شكل ٣-٢٣: بارسونيت من منجم سايو بيدرو **São Pedro** بالبرازيل.

٧- مجموعة معادن زرنيخات اليورانيوم

Uranium Arsenates

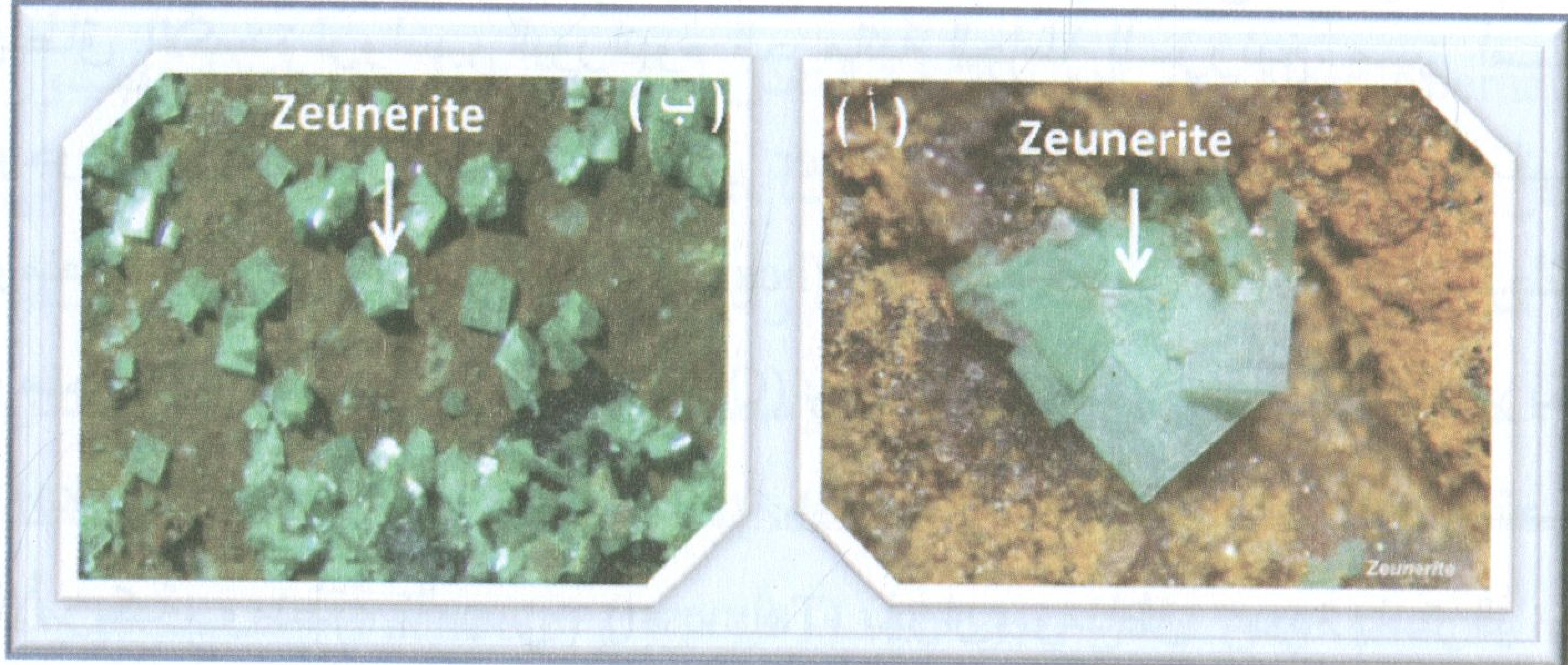
تعد جميع معادن هذه المجموعة على إنها معادن ثانوية ناتجة عن تغاير الزرنيخات واليورانينيت، ومن أمثلتها: الزيونيريت (Zeunerite)، والميتا- زيونيريت (metazeunerite)، والهاليمونديت (hallimondite)، والأرسينيو- رانيليت (arsenuranylite)، والأبيرناثيت (abernathyite)، والنوفاسيكيت (novacekite)، والهينريشيت (heinrichite)، والتروجيريت (troegerite)،

والكاليريت (kahlerite)، واليورانوسبينيت (uranospinite)، والميتا-كيرشهايميريت (metakirchheimerite)، والفالبورجيت (walpurgite). توجد هذه المعادن في كميات قليلة على شكل بلورات أو قشور. من أشهر معادن مجموعة الزرنيخات وأكثرها انحلالاً: معدن الزيونيريت، والميتا-زيونيريت، واليورانوسبينيت. يتعرض الزيونيريت بسهولة إلى عمليات لا هدرجة، حيث يتحول إلى ميتا-زيونيريت، حيث يشبها في لونهما الأخضر وبريقهما الزجاجي معدن التوربيرنيت، ولكن يمكن التمييز بينهما عن طريق تحليل حيود الشعة السينية. كما يشبه أيضاً اليورانوسبينيت وتوأمه الميتا-يورانوسبينيت معدن الأوتونيت، والنوفيسكيت من حيث اللون الأصفر والتفسفر (flourescence) الأصفر الليموني الفاتح.

زيونيريت Zeunerite Cu $(UO_2)_2(AsO_4)_2.10\text{-}16H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٢م، حيث يرجع اسمه إلى الفيزيائي الألماني جوستاف زيونير (Gustav Zeuner). ويتبلور المعدن بفصيلة الرباعي. وتظهر بلورات المعدن على شكل بلورات هرمية ثنائية، أو على شكل عمداني مربع (شكل ٣-٢٤). وتبدو البلورات على هيئة مكعبات، وأيضاً على شكل قشري، أو صفائحي، أو متورق، أو ترابي. ويتغير اللون من أخضر إلى أصفر. ويكون البريق زجاجي، أو لؤلؤي على بعض أسطح الانفصام. والبلورات شفافة إلى غير شفافة. والانفصام جيد في مستوى واحد (قاعدي basal). المكسر غير مستوي، والصلادة =٢-٢,٥ والوزن النوعي=٣,٢-٣,٤. المخدش أخضر شاحب. من المعادن المصاحبة: باريت، وفلوريت، وأوليفينيت، وسكورودايت (Scorodite)، وميكسيت (Mixite)، ويورانينيت، ومعادن يورانيوم أخرى. من

أهم مناطق وجوده: منطقة أريزونا بأمريكا، ومنطقة ساكسوني بألمانيا، ومنطقة كورنوال بانجلترا، وفي بعض المناطق الأخرى في صحبة معادن الزرنيخات.



شكل ٣-٢٤: (أ) بلورات عمدانية لمعدن الزيونيريت من منجم سينوفيك (Cinovec) بجمهورية التشيك.
(ب) بلورات مكعبية الشكل لمعدن الزيونيريت.
(www.cns-snc.ca/graphics/u-th/zeunerite.jpg)

ميتا-زيونيريت Meta-zeunerite $Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٣٧م، ويرجع اسمه إلى معدن الزيونيريت حيث يمثل الصنف الأقل هدرجة. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل عمداني أو صفائحي. اللون أخضر، أخضر زرعي إلى زيتوني (شكل ٣-٢٥). البريق زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش أبيض مخضر. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٢,٥، ومتوسط الوزن النوعي ٣,٦٤. من المعادن المصاحبة: توربيرنيت، وفروجيريت،



شكل ٣-٢٥: بلورات مكعبية لمعدن الميتا-زيونيريت من منجم سينتينيال أويريكا بأمريكا.
http://www.mindat.org/show.php?id=2698&ld=2

وفالبورجيت، ويورانوسبينيت، وإريثريت (Erythrite)، وميميتيت (Mimetite)، وأوليفينيت وكالكو–فيلليت. ويعتبر المعدن من المعادن الثانوية غير الشائعة بنطاق الأكسدة لرواسب اليورانيوم الحرمائية الحاملة للزرنيخ. من أماكن وجوده: منجم فايسر هيرش (Weisser Hirsch) والغابات السوداء بألمانيا، ومنطقة وييل جورلاند (Wheal Gorland) ومنجم جيفور (Geevor) بإنجلترا، ومنجم كاب جاروني (Cap Garonne) بفرنسا، ومنجم سينتينيال أويريكا (Centennial Eureka) ومنجم ماجوبا هيل (Majuba Hill) بالولايات المتحدة الأمريكية، ومنطقة تالميسي (Talmessi) بإيران، ومناطق عديدة باستراليا مثل اليجاتور فاللي (South Alligator Valley)، ومنجم بيدرا بريتا (Pedra Preta) بالبرازيل.

هاليمونديت Hallimondite $Pb_2(UO_2)(AsO_4)_2$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٥م، ويرجع اسمه إلى عالم علم المعادن البريطاني أرثر هاليموند (Arthur Hallimond). يتبلور المعدن بفصيلة الميول الثلاثة، وتوجد البلورات على شكل نصلي، أو مسطح، أو مخطط، أو على شكل قشور، اللون أصفر (شكل ٣–٢٦أ). البريق شبه صمغي، والمخدش أصفر فاتح. تتراوح الصلادة بين ٢,٥ و ٣، ومتوسط الوزن النوعي ٦,٣٩. من المعادن المصاحبة: هيجيليت (Hiigelite)، وميميتيت (Mimetite)، وباريت، وجالينا وكوارتز. ويعتبر المعدن من المعادن الثانوية غير الشائعة بنطاق الأكسدة لرواسب حاملة للزرنيخ والرصاص وينتج عن تجوية الجالينا. ويوجد المعدن بالعديد من المناطق بالمانيا، مثل: منجم ميشيل (Michael)، ومنجم بيلسكوبف (Biihlskopf) بالقرب من منطقة إلويلار (Ellweiler).

أبيرناثيت Abernathyite $K(UO_2)(AsO_4)_2 \cdot 3H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٦م، ويرجع اسمه إلى جيس أبيرناثي (Jess Abernathy) وهو الذي اكتشف المعدن بمنجمه بولاية يوتا Utah. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل عمداني، يصل طولها إلى ٠,٥ مم. اللون أصفر (شكل ٣-٢٦ب)، والبريق زجاجي، والمخدش أصفر فاتح. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٣، ومتوسط الوزن النوعي ٣,٣٢. من المعادن المصاحبة: سكوروديت (Scorodite)، وزيونيريت، وهاينريشايت (Heinrichite). ومن أماكن وجوده: منجم فيومرول (Fuemrole) ومنجم كيف هيلز (Cave Hills) بالولايات المتحدة الأمريكية، ومنجم ريفيرال (Riviéral) بفرنسا، ومنجم سيلاوف (Sailauf) بمنطقة بافاريا بألمانيا.

أرسينيورانيليت Arsenuranylite $Ca(UO_2)_4(AsO_4)_2(OH)_4.6H2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٨م، ويرجع اسمه إلى تركيبه الكيميائي وإلى علاقته بمعدن الفوسفورانيليت (Phosphuranylite). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل قشور. اللون برتقالي إلى أصفر (شكل ٣-٢٦ج). البريق زجاجي، والمخدش أصفر فاتح. ويبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، ومتوسط الوزن النوعي ٤,٢٥. ويعتبر المعدن من المعادن الثانوية المتكونة بنطاق الأكسدة لرواسب الكبريتيدات الحاملة للزرنيخ. ومن المعادن المصاحبة: ميتا-زوينيريت، ويورانوسبينيت، ونوفاسيكيت، وشوبيت. ومن أماكن وجوده: منجم شيركاسار بأوزباكستان (Cherkasar, Uzbekistan)، كما يوجد المعدن بالعديد من المناطق بألمانيا، مثل: منطقة مينيتسينشفاند (Menzenschwand) بالغابات السوداء، ومنطقة بيرجين بولاية ساكسوني، ومنجم ستروبيرج (Streuberg).

نوفاسيكيت Novacekite $Mg(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 12(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥١م، ويرجع اسمه إلى تكريم عالم علم المعادن التشيكي راديم نوفاسيك (Radim Nováček). يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل تجمعات صفائحية شبه متوازية، أو عمدانية سميكة. اللون أصفر إلى أصفر فاتح (شكل ٣-٢٦د)، والبريق زجاجي، والمخدش أبيض مصفر. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٣,٧. من المعادن المصاحبة: زيونيريت، ويورانوفان، وشوبيت وباراشوبيت، ويورانوسبينيت، وكالكوبيريت، وأرزينوبيريت، وسفاليريت. من أماكن وجوده: منطقة شنيبيرج (Schneeberg) بالغابات السوداء، ومنجم ميشيل (Michael) ألمانيا، ومنجم رابيجاك بفرنسا، ومنطقة وييلز أوليس (Wheals Owles) بإنجلترا، ومنطقة نيديلز أي (Needles Eye) بسكتلندا، ومنجم بيدرا بريتا (Pedra Preta) بالبرازيل، ومنجم لاس أنيماس (Las Animas) بمكسيكو، ومنطقة وودرو (Woodrow)، ومنجم وايت كينج (White King) بالولايات المتحدة الأمريكية.

هينريشيت Heinrichite $Ba(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 11(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٨م، ويرجع اسمه إلى تكريم عالم علم المعادن الأمريكي إبيريرت هينريش (Eberhardt Heinrich). يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل عمداني، أو قشري. اللون أخضر، أو أصفر إلى أخضر مصفر (شكل ٣-٢٦هـ)، والبريق زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش أبيض مصفر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، ومميز بالمستوى [100]. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٣,٦١. من المعادن المصاحبة: زيونيريت، وميتا-هينريشيت، ونوفاسيكيت، وإريثريت، ويورانينيت. من أماكن وجوده: منجم وايت كينج (White King) بالولايات المتحدة

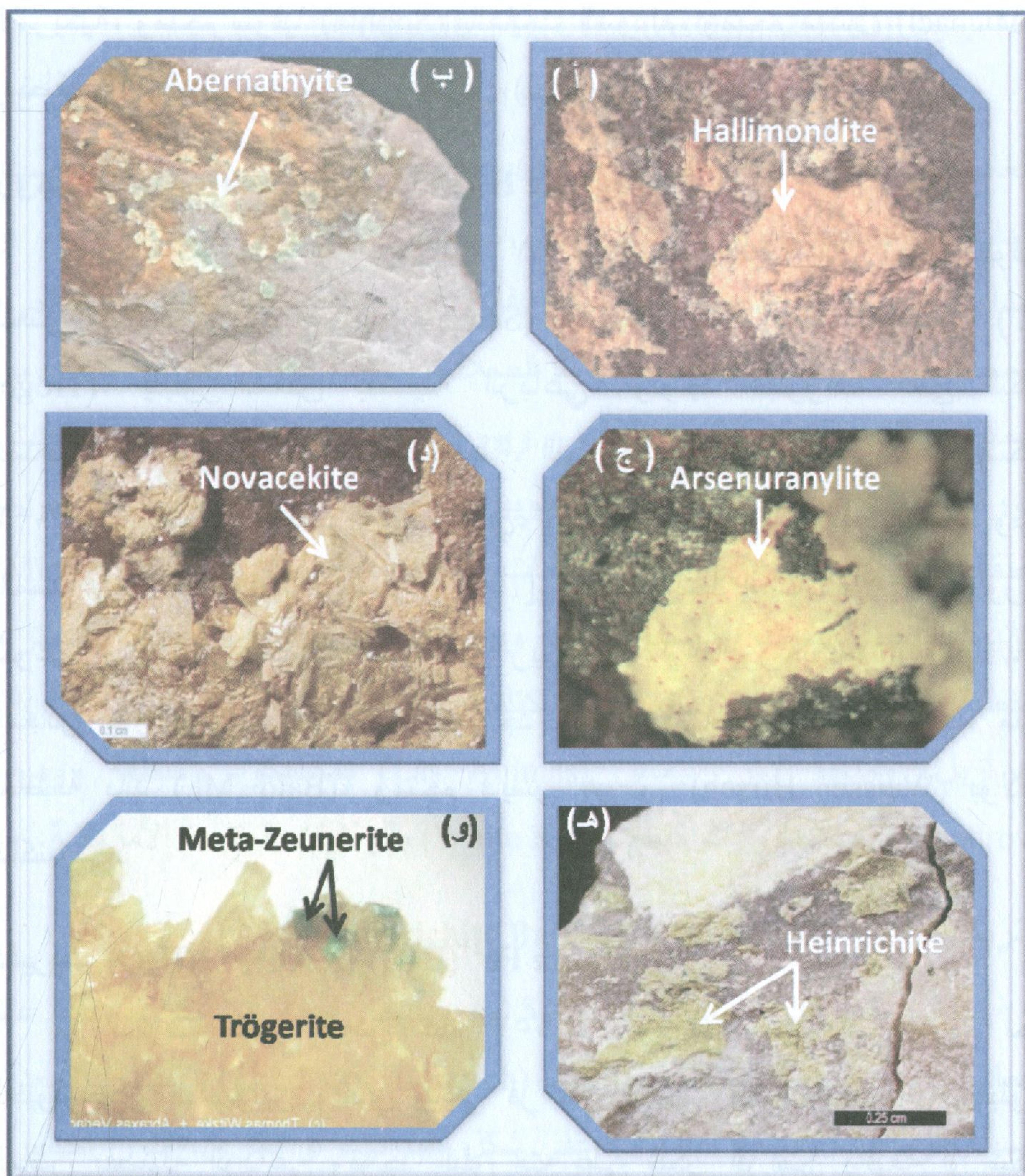
الأمريكية، ومنجم سوفيا (Sophia) بالغابات السوداء، ومنجم ميشيل (Michael)، ومنطقة بافاريا بألمانيا، ومنجم ريفيرال (Riviéral) بفرنسا.

تروجيريت Trögerite $H_2(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧١م، ويرجع اسمه إلى أحد مسئولي التعدين بمنطقة شنيبيرج (Schneeberg) بألمانيا، والذي يدعى تروجير (R. Tröger). يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل عمداني، أو كتلي، أو بلورات مخططة. اللون أصفر إلى أصفر ليموني (شكل ٣-٢٦و)، والبريق زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش مصفر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، وجيد بالمستوى [100]. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٣,٥٥. من المعادن المصاحبة: زيونيريت، والفالبورجيت (walpurgite)، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. ويوجد المعدن بمناطق عديدة بألمانيا، مثل مقاطعة بالد (Bald Mt.)، ومنجم فايسر هيرش (Weisser Hirsch) بولاية ساكسوني.

كاليريت Kahlerite $Fe^{2+}(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 11(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٣م ويرجع اسمه إلى تكريم أحد الجيولوجيين النمسويين والذي يدعى فرانتس كالير (Franz Kahler). يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي وتوجد البلورات على شكل أقراص رفيعة أو شكل قشري. اللون أخضر مصفر أو ليموني والبريق زجاجي والمخدش أصفر فاتح. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٥ والوزن النوعي غير معلوم. يوجد المعدن بنطاق الأكسدة لرواسب الحديد الحاملة لليورانينيت، ومن المعادن المصاحبة: أرسينوسيدريت، زوينيريت، ميتا-زوينيريت، ملاكيت، ميتا-كاليريت. يوجد المعدن بمنجم سوفي (Sophie) بألمانيا، منطقة هاتينبيرج (Hüttenberg) بالنمسا، حيث يوجد مصاحباً لرواسب السيدريت.



شكل ٣-٢٦: (أ) هاليمونديت على شكل عرق من منجم الويلير (Ellweiler) بألمانيا. (ب) أبيرناثيت من منجم ريفيرال بفرنسا (aberna.jpg www.weblio.jp/img/dict/ktkbt/~ug7s-ktu/). (ج) أرسينيورانيليت من رواسب شيركاسار Cherkasar بأوزبيكستان. (د) نوفاسيكيت وميتا-نوفاسيكيت من منجم رابجاس Rabjac بفرنسا. (هـ) قشور من معدن الهينريشيت على معدن طيني من منجم لاكفيو Lakview بأمريكا. (و) بلورات صفراء اللون من التروجيريت مع بلورات خضراء اللون من الميتا-زيونيريت من منجم فايسر هيرش Weisser Hirsch بولاية ساكسوني بألمانيا.

ميتا–كيرشهايميريت Metakirchheimerite $Co(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٨م، ويرجع اسمه إلى تكريم الرئيس السابق للمساحة الجيولوجية بولاية بادين فورتيمبرج (Baden-Württemberg) بألمانيا، والذي يدعى فرانتس كيرشهايمير (Franz Kirchheimer). يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل عمداني مربع. اللون وردي فاتح، والبريق لؤلؤي، والمخدش أبيض. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٢,٥، ومتوسط الوزن النوعي ٣,٢٢. يوجد المعدن بنطاق الأكسدة لرواسب المحاليل الحرمائية الغنية باليورانيوم والزرنيخ. من المعادن المصاحبة: ميتا–كاليريت، ونوفاسكيت، وميتا–هينريشيت، وإريثريت، ويورانينيت. يوجد المعدن بمنجم صوفيا (Sophia) بالغابات السوداء بألمانيا.

يورانوسبينيت Uranospinite $Ca(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 10(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٣م، ويرجع اسمه إلى محتواه من اليورانيوم، وإلى لونه المميز. يتبلور المعدن بفصيلة الرباعي، وتوجد البلورات على شكل بلورات عمدانية نحيفة، وأيضاً على شكل تجمعات وقشور. اللون أخضر، أو أصفر ليموني إلى أخضر مصفر (شكل ٣–٢٧أ) والبريق لؤلؤي والمخدش أصفر فاتح. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001] وجيد بالمستوى [100]. يبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٣,٤٥. يوجد المعدن بنطاق الأكسدة لرواسب المحاليل الحرمائية الغنية باليورانيوم والزرنيخ. من المعادن المصاحبة: زوينيريت، وميتا–زوينيريت، وميتا–يورانوسيرسيت، ويورانوفان، وتروجيريت، والبيرجيت، ويورانوسفيريت، وشوبيت، وبارا–شوبيت، ونوفاسكيت. يوجد المعدن بمنجم صوفيا (Sophia)، ومنجم فايسر هيرش

(Weisser Hirsch) بألمانيا، ومنجم رابيجاس (Rabéjac) بفرنسا، ومنجم راديوم هيل (Radium Hill) بجنوب استراليا، ومنطقة سلايد لونج (Clyde Long) بولاية يوتا، ومنطقة باريا (Paria) بولاية أريزونا.

فالبورجيت Walpurgite $Bi_4(UO_2)O_4(AsO_4)_2 .2H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧١م، ويرجع اسمه إلى مكان اكتشافة بعرق فالبورجيز بمنطقة شنيبيرج (Walpurgis vein, Schneeberg) بألمانيا. يتبلور المعدن بفصيلة الميول الثلاثة، وتوجد البلورات على شكل نسيلي، أو عمداني، أو تجمعات على شكل شعاعي، أو شبه شعاعي. المعدن عديم اللون إلى أصفر شمعي (شكل ٣-٢٧ب)، والبريق صمغي، والمخدش أبيض مصفر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]. يبلغ متوسط الصلادة ٣,٥، والوزن النوعي ٥,٩٥. يوجد المعدن بنطاق الأكسدة لرواسب غنية باليورانيوم والبيزموث. من المعادن المصاحبة: تروجيريت، وزيونيريت، ويورانوسفيريت، ويورانوسبينيت،



شكل ٣-٢٧: (أ) بلورات شفافة صفائحية من اليورانوسبينيت من منجم جروبي بالسكوبف Grube Buhlskopf بألمانيا. (ب) بلورات نصلية صفراء اللون لمعدن الفالبورجيت من منطقة شنيبيرج بألمانيا.

وتوربيرنيت. ويوجد المعدن بمناجم عديدة بألمانيا مثل: منجم فايسير هيرش (Weisser Hirsch)، ومنجم إلياس (Elíáŝ) بجمهورية التشيك، وبمنطقة ساوزويك كليفس (Southwick Cliffs) بسكوتلاندا.

٨- مجموعة معادن كربونات اليورانيوم
Uranium Carbonate

تتميز معادن هذه المجموعة بعمرها القصير حيث تميل إلى الذوبان بسهولة في المياه العذبة. تعتبر معقدات كربونات اليورانيل أكثر المعقدات أهمية في المحاليل، ويرجع ذلك إلى ثباتها واستقرارها النسبي في المحاليل مما يساعد على هجرة اليورانيوم في صورة معقدات كربونات اليورانيل إلى مسافات طويلة (Langmuir, 1978). تلعب معقدات كربونات اليورانيل دوراً هاماً في المحاليل المتعادلة إلى القلوية (أس هيدروجيني pH أكبر من ٧). يتم ترسيب معادن كربونات اليورانيل نتيجة عمليات تبخير للمحاليل القلوية. تعد مجموعة معادن الكربونات ثانوية النشأة. يميل اليورانيل، شأنه شأن الأكتينيدات الأخرى، إلى تكوين أيون ثاني أكسيد اليورانيوم (يورانيل UO_2). تحت الظروف البيئية العادية، يتحد أيون اليورانيل مع أيون الكربونات ليكون معقدات كربونات اليورانيل. رغم أن مركبات اليورانيوم تكون عادةً في صورة صلبة غير قابلة للذوبان، أو أنها تمتص بسهولة على أسطح المعادن الأخرى تحت ظروف قلوية، إلا أن معقدات الكربونات تزيد من درجة ذوبان مركبات اليورانيوم، وأيضاً من قدرتها على الحركة والانتشار. توجد عادةً معادن كربونات اليورانيل على شكل قشور رقيقة على أسطح المعادن الأخرى، ويرجع ذلك إلى سهولة ذوبان هذه المعادن. ومن أمثلة معادن هذه المجموعة: الأنديرسونيت، والبيلييت، والجريمسيليت، والليبيجيت، والرابيتيت، والرازرفوردين، والوايريتيت،

والشروكينجيريت، والشاربيت، والزيليريت، والسوارتزيت. يعتبر معدني الشروكينجيريت والليبيجيت من أهم معادن هذه المجموعة، والتي توجد كرواسب الكاليش، أو بالأجزاء المؤكسدة لرواسب اليورانيوم الأولية.

أنديرسونيت Andersonite $Na_2Ca(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 6(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٤٨م، ويرجع اسمه إلى تكريم أحد الجيولوجيين بالمساحة الجيولوجية الأمريكية، والذي يدعى شارلز أنديرسون (Charles Anderson). يتبلور المعدن بفصيلة السداسي، وتوجد البلورات على شكل مكعب كاذب، أو على شكل تجمعات وقشور متبلورة. اللون أخضر إلى أخضر مصفر (شكل ٣-٢٨أ)، والبريق زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش أخضر شاحب. لا يوجد انفصام، ويبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٢,٨٣. يوجد المعدن بنطاق الأكسدة لرواسب المحاليل الحرمائية متعددة الفلزات. من المعادن المصاحبة: شروكينجيريت، وبيلييت، وشفارتزيت (Shwartzite)، وبولتووديت، وليبيجيت، وجبس. يوجد المعدن بالعديد من المناجم بأمريكا، مثل: منجم هيلسايد (Hillside) بولاية أريزونا، ومنجم ديرمو سيندر (Deremo-Snyder) بكولورادو. كما يوجد المعدن بمنجم ميرثينجرابن (Myrthengraben) بالنمسا، ومنجم جيفور (Geevor) بإنجلترا، ومنطقة ستريبا (Stripa) بالسويد، ومنجم هيوميل (Huemul) بالأرجنتين.

بيلييت Bayleyite $Mg_2(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 18(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٤٨م، ويرجع اسمه إلى تكريم أحد أساتذة علم المعادن الأمريكيين بجامعة إلينويس (Illinois)، والذي يدعى وليم بيلي (William Bayley). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل منشوري، أو على شكل تجمعات وقشور متبلورة. اللون أصفر، وأصفر

فاتح إلى أبيض مصفر (شكل ٣-٢٨ب)، والبريق زجاجي إلى قاتم، والمخدش أبيض. لا يوجد انفصام، ويبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٢,٠٥. من المعادن المصاحبة: شروكينجيريت، وأنديريسونيت، وشفارتزيت، وليبيجيت، وكارنوتيت، وتيامونيت، ويورانوفان، والجبس. يوجد المعدن بالعديد من المناجم بأمريكا، مثل: منجم هيلسايد، وبحيرة أمبروزيا (Ambrosia) بنيو مكسيكو، ومنجم تايجر(Tiger) بولاية يوتا، ومنجم جارفيلد ورايفيل (Garfield and Rifle) بكولورادو. كما يوجد المعدن بمنجم رابيت ليك بكندا، وبالقرب من منطقة أزيجور (Azegour) بالمغرب، ومنجم هيوميل (Huemul) بالأرجنتين، ومنطقة ماسد ألاري (Mas-d'Alary) بفرنسا.

جريمسيليت Grimselite $K_3Na(UO_2)(CO_3)_3\cdot(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٧٢م، ويرجع اسمه إلى مكان إنتاجه لأول مرة بمنطقة جريمسيل (Grimsel) بسويسرا. يتبلور المعدن بفصيلة السداسي وتوجد البلورات على شكل منشور سداسي، أو على شكل تجمعات، وقشور دقيقة التبلور. اللون أصفر (شكل ٣-٢٨ج)، والبريق زجاجي، والمخدش أصفر شاحب. لا يوجد انفصام، ويبلغ متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٣,٣٠. يوجد كمعدن ثانوي على شكل عروق بصخور الجرانوديوريت. من المعادن المصاحبة: شروكينجيريت، وبيليزايت (baylissite)، وكالسيت. يوجد المعدن بمنطقة جريمسيل (Grimsel) بسويسرا.

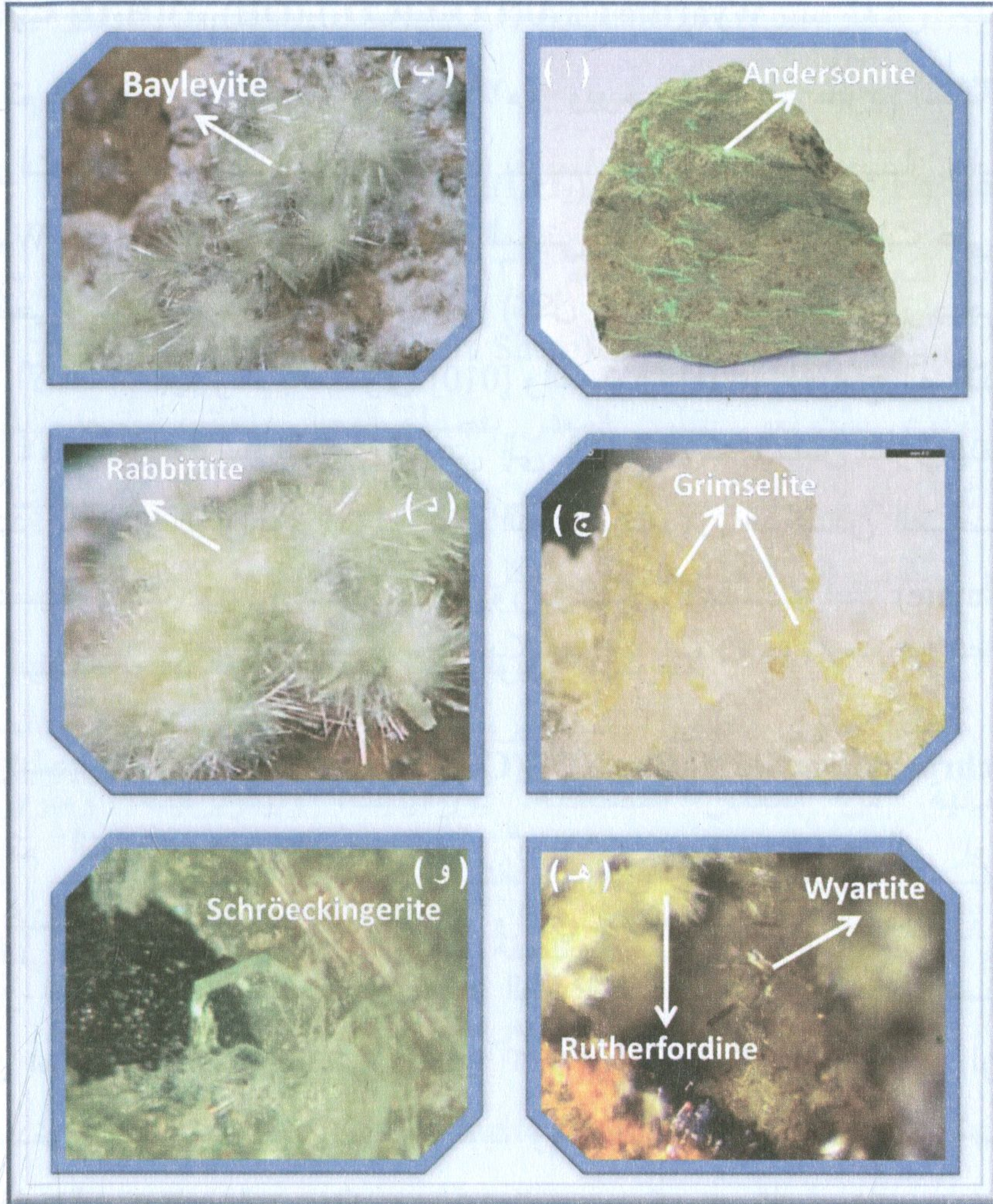
رابيتيت Rabbittite $Ca_3Mg_3(UO_2)_2(CO_3)_6(OH)_4\cdot 18\ H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٥م، ويرجع اسمه إلى تكريم أحد الجيوكيميائيين بالمساحة الجيولوجية الأمريكية، والذي يدعى جون رابيت (John

Rabbitt). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل إبري، أو ليفي. اللون أخضر شاحب إلى أصفر مخضر (شكل ٣-٢٨د)، والبريق حريري. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]، ويصل متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٢,٥٨. يوجد كمعدن ثانوي ذي نشأة لاحقة لعمليات التعدين. من المعادن المصاحبة: تسيبيت (zippeite)، وفورماريريت، وكالسيت، وجبس. ويوجد المعدن بمنجم لاكي سترايك رقم ٢ بولاية يوتا بأمركا، ومنطقة جواكيمشتال (Joachimsthal) بجمهورية التشيك.

رازرفوردين Rutherfordine $UO_2(CO_3)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٠٦م، ويرجع اسمه إلى تكريم الفيزيائي إيرنست رازرفورد (Ernest Rutherford). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل نصلي، إشعاعي، ليفي أو ترابي. اللون بني، وأصفر بني، وأبيض إلى برتقالي بني (شكل ٣-٢٨هـ)، والبريق ترابي. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]، ومميز بالمستوى [001]. يصل متوسط الصلادة إلى ٢,٥، والوزن النوعي ٥,٧. يوجد كمعدن ثانوي ناتج عن تجوية اليورانينيت. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وبيكويرليت، ومازيونيت، وشوبيت، وكاسوليت، وكوريت، وبولتووديت، وفانديندريشيت، وبيلييت، وميتا-توربيرنيت، وفورماريريت، وسكلودوويسكيت. يوجد المعدن بالعديد من المناجم بأمركا، مثل منجم باليمرو (Palermo) بنيو هامبشاير ، ومنجم دلتا (Delta) بولاية يوتا. كما يوجد بمنجم ساوز تراس (South Terras) بكورنوال (Cornwall) بإنجلترا، ورواسب اليورانيوم بمنطقة رابيجاك (Rabéjac) بفرنسا، ومنجم كرانكيلباختال (Krunkelbachtal) بالغابات السوداء بألمانيا، ورواسب نابيرليك (Nabarlek) بالمقاطعة الشمالية لاستراليا.



شكل ٣-٢٨: (أ) عروق خضراء اللون من الأنديرسونيت بصخور الحجر الرملي بمنجم أتوميك كينج (Atomic King) بولاية يوتا، الولايات المتحدة الأمريكية. (ب) بيلييت من منجم هيداوت Hideout بولاية يوتا، الولايات المتحدة الأمريكية (http://www.uraniumminerals.com). (ج) قشور صفراء اللون من معدن الجريمسيليت على معدن الكوارتز من نفق جيريشتنيج-سومرلوك - Gerstenegg Sommerloch بسويسرا. (د) بلورات إبرية من معدن الرابيتيت من منجم هيداوت بولاية يوتا، الولايات المتحدة الأمريكية. (هـ) صحبة من بلورات إبرية بنية اللون من معدن الويرتيت مع بلورات صفراء اللون من معدن الرازرفوردين. (و) بلورة ثلاثية الميل لمعدن الشروكينجيريت من مقاطعة تومبسون Thompsons بولاية يوتا الأمريكية.

وايرتيت Wyartite $Ca_3U(UO_2)_6(CO_3)_2(OH)_{18}\cdot 3(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٨م، ويرجع اسمه إلى تكريم أستاذ علم البلورات بجامعة سوربون (Sorbonne) بفرنسا، والذي يدعى جيان وايرت (Jean Wyart). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل صفائحي. اللون أسود مخضر إلى بني (شكل ٣-٢٨هـ)، والبريق زجاجي إلى قاتم. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010] والمستوى [001]. تتراوح الصلادة بين ٣ و ٤، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٤,٦٩. يوجد كمعدن ثانوي بنطاق الأكسدة لمعادن اليورانيوم الأولية مثل اليورانينيت. من المعادن المصاحبة: ويلسيندورفيت، ورازرفوردين، ويورانوفان، وماسيونيت (masuyite)، ويورانينيت. يوجد المعدن بمنجم شينكولوبوي بالكونغو.

شروكينجيريت Schröeckingerite $NaCa_3(UO_2)(CO_3)_3(SO_4)F\cdot 10(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٧٨٣م، ويرجع اسمه إلى يوليوس شروكينجير (Julius Schröckinger)، والذي قد تعرف على المعدن ووصفه. يتبلور المعدن بفصيلة الثلاثي، وتوجد البلورات على شكل حبيبات مستديرة. اللون أصفر إلى أصفر مخضر (شكل ٣-٢٨و)، والبريق زجاجي إلى لؤلؤي، والمخدش أصفر شاحب. الانفصام جيد وتام بالمستوى [001]. يصل متوسط الصلادة إلى ٢,٥، والوزن النوعي ٢,٥٥. يوجد كمعدن ثانوي ناتج عن تجوية اليورانينيت. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وبيكويرليت، ومازيونيت، وشوبيت، وكاسوليت، وكوريت، وبولتووديت، وفانديندريشيت، وبيلييت، وميتا-توربيرنيت، وفورماريريت، وشتودايت، وسكلودوويسكيت. يوجد المعدن بالعديد من المناجم بالولايات المتحدة الأمريكية، مثل منجم هيلسايد (Hillside) بولاية أريزونا. كما يوجد المعدن بمنطقة جاكيموف (Jachymov) بجمهورية التشيك، وبمنطقة جونجيورجينشتات (Johanngeorgenstadt) بولاية ساكسوني بألمانيا،

ومنطقة رادهاوسبيرج (Radhausberg) بالنمسا، ومنجم لا سوبيرانيا (La Soberania) بالأرجنتين.

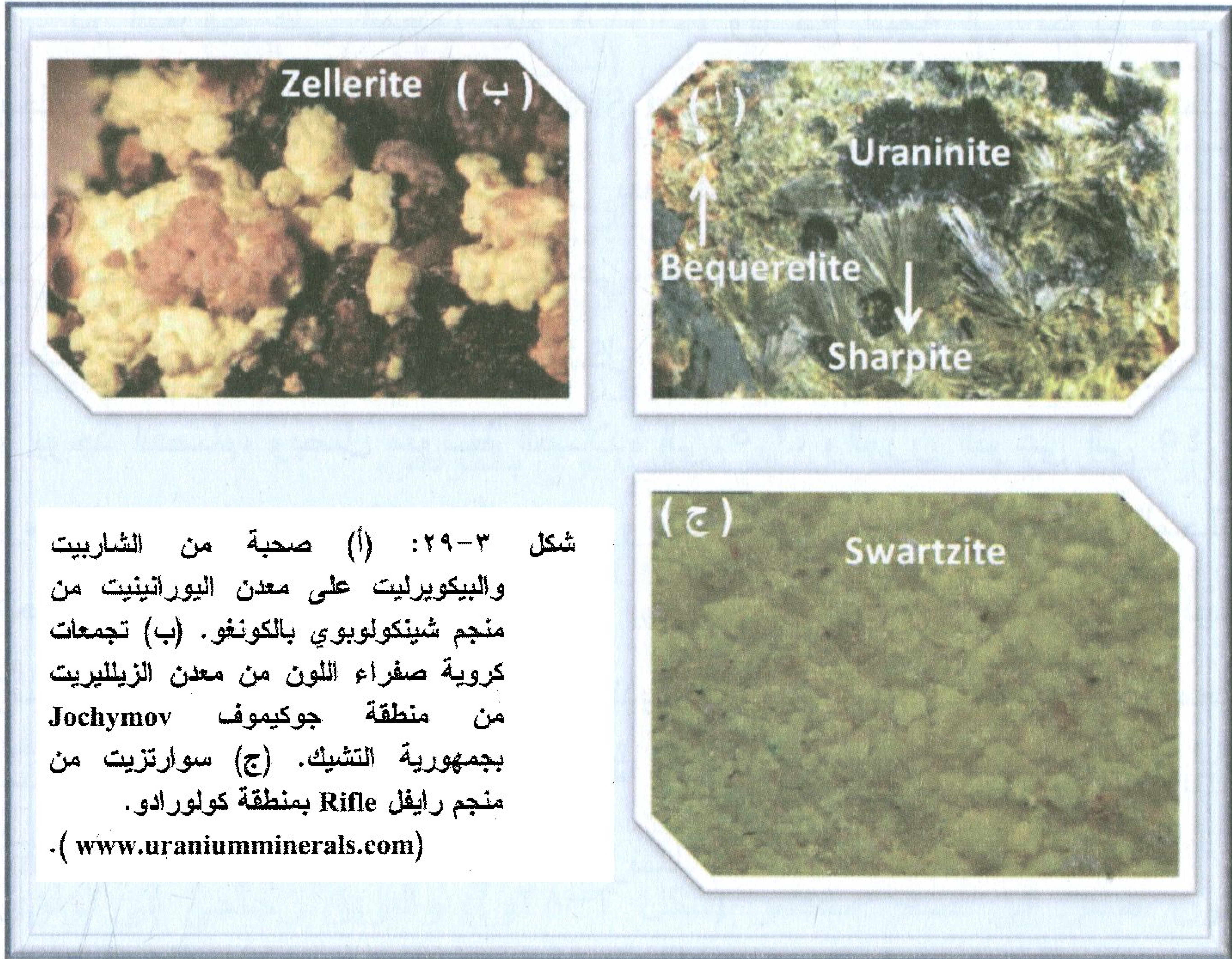
شاربيت Sharpite $Ca(UO_2)_6(CO_3)_5(OH)_4 \cdot 6(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٣٨م، ويرجع اسمه إلى تكريم مهندس إنجليزي يدعى روبيرت شارب (Robert Sharp)، والذي اكتشف المعدن بمنجم شينكولوبوي بالكونغو. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل إبري، أو ليفي، أو شعاعي، أو قشري. اللون أصفر مخضر، أو أخضر زيتوني إلى أبيض مخضر (شكل ٣-٢٩أ)، والبريق زجاجي إلى ترابي. لا يوجد انفصام، ويصل متوسط الصلادة إلى ٢,٥، والوزن النوعي إلى ٤,٤٥. يوجد كمعدن ثانوي بنطاق الأكسدة برواسب اليورانيوم المتكونة من المحاليل الحرمائية. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وبيكويرليت، ومازيونيت، وشوبيت، وكوريت، ويورانوفان، وفانديبنراندايت، وإيانثينايت. يوجد المعدن بمنجم شينكولوبوي بالكونغو، وبمنطقة كروث وهاوت-رين (Kruth, Haut-Rhin) ومنجم بروجويد (Brugeaud) بفرنسا.

زيليريت Zellerite $Ca(UO_2)(CO_3)_2 \cdot 5(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٣م، ويرجع اسمه إلى تكريم مكتشفه الجيولوجي الأمريكي هوارد زيلير (Howard Zeller). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل ليفي، أو شعاعي أو إبري. اللون أصفر مبيض إلى ليموني (شكل ٣-٢٩ب)، والبريق ترابي إلى قاتم. لا يوجد انفصام. يصل متوسط الصلادة إلى ٢، والوزن النوعي إلى ٣,٢٥. يوجد كمعدن ثانوي بنطاق الأكسدة المتوفر بها البيريت عند درجة حامضية (pH) منخفضة. من المعادن المصاحبة: معادن كبريتيدات الحديد، وميتا-زيليريت، وجبس،

شوبيت، وميتا-أوتونيت، ويورانوفان. يوجد المعدن بمنجم لاكي (Lucky Mc)، ومنجم بات رقم ٨ (Pat No. 8)، ومنجم وايت (White) بالولايات المتحدة الأمريكية، ومنطقة جواكيمشتال (Joachimsthal) بجمهورية التشيك.



شكل ٣-٢٩: (أ) صحبة من الشاربيت والبيكويريليت على معدن اليورانينيت من منجم شينكولوبوي بالكونغو. (ب) تجمعات كروية صفراء اللون من معدن الزيلليريت من منطقة جوكيموف Jochymov بجمهورية التشيك. (ج) سوارتزيت من منجم رايفل Rifle بمنطقة كولورادو. (www.uraniumminerals.com).

سوارتزيت Swartzite $CaMg(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 12(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٦١م، ويرجع اسمه إلى تكريم أستاذ الجيولوجيا وعلم المعادن بجامعة جون هوبكين (Johns Hopkins) بالولايات المتحدة الأمريكية، والذي يدعى شارلز سوارتز (Charles K. Swartz). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل منشوري أو قشري. اللون أصفر، أو أبيض مصفر إلى أخضر فاتح (شكل ٣-٢٩ج)، والبريق ترابي. لا يوجد انفصام ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٢,٣. يوجد كمعدن

ثانوي بنطاق الأكسدة برواسب الكبريتيدات متعددة الفلزات. من المعادن المصاحبة: الجبس، وشروكينجيريت، وأنديرسونيت، وبيلييت. يوجد المعدن بالعديد من المناجم بالولايات المتحدة الأمريكية، مثل منجم هيلسايد (Hillside) بولاية أريزونا، ومنجم رايفيل (Rifle) بكولورادو، ومنجم كورال (Coral) بولاية يوتا.

٩- مجموعة معادن كبريتات اليورانيوم
Uranium Sulfates

تتكون معادن هذه المجموعة من جراء أكسدة الكبريتيدات إلى كبريتات ذائبة في المياه الجوفية، والتي يمكن أن تتحد مع أيون اليورانيل (UO_2^{2+}) لتكّون معقدات كبريتات اليورانيوم في المحاليل. تترسب معادن كبريتات اليورانيوم من تلك المحاليل بالتبخير، أو عند تغير الظروف المحيطة بها. تميل المحاليل التي يترسب منها هذه المعادن إلى الحامضية، تصل درجة الحامضية (pH) إلى حوالي ٦ (Ondrus *et al.*, 1997). مثل معادن كربونات اليورانيوم، تتميز معادن كبريتات اليورانيوم بالعمر القصير وسهولة ذوبانها في المياه العذبة. غالباً ما توجد معادن كبريتات اليورانيوم في غياب معادن كربونات اليورانيوم، يعكس ذلك اختلاف مدى درجة الحامضية التي يتواجد عندها معقدات كل من كربونات وكبريتات اليورانيوم (Ondrus *et al.*, 1997). تتكون معادن كبريتات اليورانيوم الثانوية من تأكسد معادن اليورانيوم الأولية مثل اليورانينيت، والكوفينيت، في وجود كبريتيدات الحديد، أو النحاس، وعدم وجود الفانيديوم، أو الفوسفات، أو الزرنيخ. ومن أهم معادن كبريتات اليورانيوم، والتي سنتناول وصفها في الفقرات التالية، معادن: التسيبيت (zippeite)، والجوهانيت (johannite)، واليورانوبيليت (uranopilite)، والرابيجاسيت (rabejacite).

تسيبيت Zippeite $K_4(UO_2)_6(SO_4)_3(OH)_{10}\cdot 4(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٤٥م، ويرجع اسمه إلى تكريم أستاذ علم المعادن الاسترالي فرانتس تسيبي (Franz Zippe). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل معيني، أو شعاعي، أو على شكل تجمعات ترابية. اللون أصفر، وأصفر ذهبي، وأحمر برتقالي إلى بني محمر (شكل ٣-٣٠أ)، والبريق ترابي إلى قاتم. الانفصام جيد وتام، ويصل متوسط الصلادة إلى ٢، ومتوسط الوزن النوعي إلى ٣,٦٦. يوجد كمعدن ثانوي بنطاق الأكسدة لمعادن اليورانيوم الأولية المصاحبة لمعادن الكبريتيدات. من المعادن المصاحبة: يورانوبيليت، وجوهانيت، ويورانوفان، وشريكونجيريت، وجبس. يوجد المعدن بمنطقة جواكيمشتال (Joachimsthal) بجمهورية التشيك، منطقة نوا رودا (Nowa Ruda) ببولندا، ومنجم جاينيسلاك (Gunnislake) بمنطقة كورنوال بأنجلترا، ومناجم دايموند جو وريمينجتون (Diamond Joe and Remington) بمنطقة كولورادو، ومنجم هيلسيد (Hillside) بالولايات المتحدة الأمريكية.

جوهانيت Johannite $Cu(UO_2)_2(SO_4)_2(OH)_2.8H_2O$

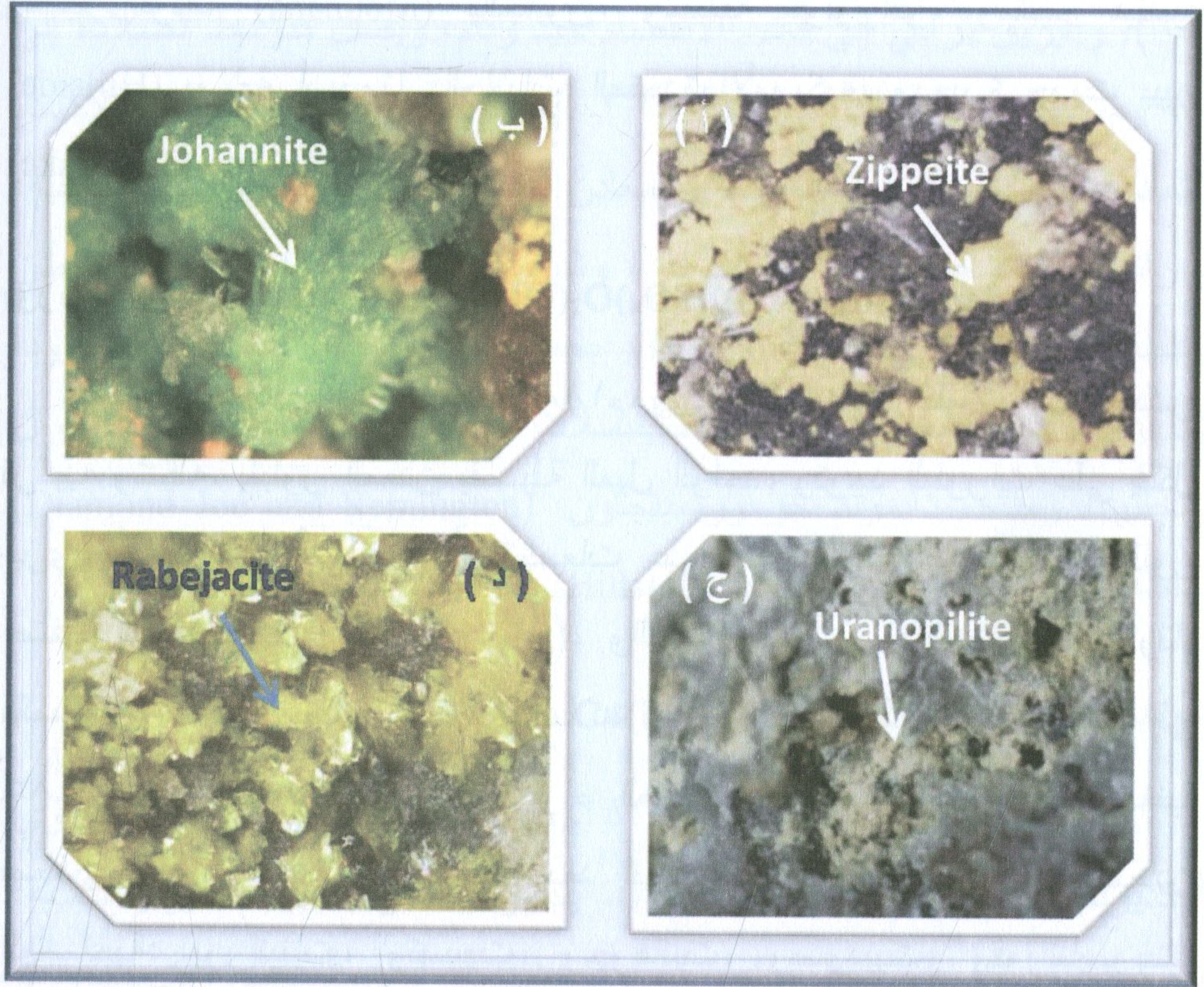
تم التعرف على المعدن عام ١٨٣٠م، ويرجع اسمه إلى العالم النمساوي أركديوك جوهان (Archduke Johann). يتبلور المعدن بفصيلة الميول الثلاثة، وتوجد البلورات على شكل منشوري، أو نصلي، أو ليفي، أو على شكل تجمعات كروية. اللون أصفر إلى أصفر مخضر (شكل ٣-٣٠ب)، والبريق زجاجي. الانفصام جيد بالمستوى [100]. يصل متوسط الصلادة إلى ٢، ومتوسط الوزن النوعي إلى ٣,٤. يندر وجوده كمعدن ثانوي بالأجزاء المؤكسدة لرواسب اليورانينيت الغنية بمعادن الكبريتيدات، يتكون عادةً بعد انتهاء عمليات التعدين. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، ويورانوبيليت، وتسيبيت، وبروكانتيت

(brochantite)، وكالكانثيت (chalcanthite)، وجبس. يوجد المعدن بمنطقة جواكيمشتال (Joachimsthal) بجمهورية التشيك، ومنطقة جوانجيورجينشتات (Johanngeorgenstadt) بولاية ساكسوني بألمانيا، ومنجم جيفور (Geevor) بمنطقة كورنوال بأنجلترا، ورواسب ماسد ألاري (Mas-d'Alary) لليورانيوم بفرنسا، ورواسب توبوشار (Taboshar) لليورانيوم بطاجيكاستان (Tajikistan)، ومنجم مونانا (Mounana) بالجابون، ومنطقة كولورادو، ومنجم هيلسيد (Hillside) بولاية أريزونا بالولايات المتحدة الأمريكية، وبحيرة جريت بيير (Great Bear Lake) بكندا.

يورانوبيليت Uranopilite $(UO_2)_6(SO_4)O_2(OH)_6(H_2O)_6 \cdot 8(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٨٢م، ويرجع اسمه إلى كلمة يونانية تعكس تركيبه وشكله. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل إبري، أو نصلي، أو ليفي، أو تجمعات على شكل وردي (rosettes). اللون أصفر إلى ليموني (شكل ٣-٣٠ج)، والبريق حريري. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]. يصل متوسط الصلادة إلى ٢، ومتوسط الوزن النوعي إلى ٣,٨٥. يوجد كمعدن ثانوي بالأجزاء المؤكسدة لرواسب اليورانينيت الغنية بمعادن الكبريتيدات، يتكون عادةً بعد انتهاء عمليات التعدين. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وتسيبيت، وجوهانيت، وصودييت، وفورماريريت، وجبس. يوجد المعدن بمنطقة جواكيمشتال (Joachimsthal) بجمهورية التشيك، ومنطقة جوانجيورجينشتات (Johanngeorgenstadt) بولاية ساكسوني بألمانيا، ومنجم جيفور (Geevor) بمنطقة كورنوال بأنجلترا، ورواسب ماسد الاري (Mas-d'Alary) لليورانيوم بفرنسا، ومنطقة نوا رودا (Nowa Ruda) ببولندا، ومنجم شنكولوبوي بالكونغو، ومنجم مونانا (Mounana) بالجابون، ومنطقة

ساوز اليجاتور (South Alligator Valley) فاللي باستراليا، ومنجم توجو (Togo) باليابان، ورواسب توبوشار (Taboshar) لليورانيوم بطاجيكستان (Tajikistan)، وولاية كولورادو، ومنجمي هابي جاك وجوماك (Happy Jack and Jomac) بالولايات المتحدة الأمريكية، وبحيرة جريت بيير (Great Bear Lake) بكندا.



شكل ٣-٣٠: (أ) تسيبيت مع صحبة من الكوفينيت والجبس من بحيرة أمبروزيا (Ambrosia Lake) بنيو مكسيكو (Photo: Maurice de Graaf). (ب) جوهانيت من منجم بلو ليزرد **Blue Lizard** بولاية يوتا، الولايات المتحدة الأمريكية. (ج) يورانوبيليت بصخور الفوسفات بمنطقة ماتجوالد **Mangualde** بالبرتغال (Photo: Maurice de Graaf). بلورات صفراء اللون لمعدن الرابيجاسيت من منجم رابيجاس بفرنسا.

رابيجاسيت $Ca(UO_2)4(SO_4)_2(OH)6\cdot6(H_2O)$Rabejacite

تم التعرف على المعدن عام ١٩٩٣م، ويرجع اسمه إلى مكان التعرف عليه بمنطقة رابيجاس Rabejac بفرنسا. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل إبري، أو نصلي، أو تجمعات على شكل وردي (rosettes) أو بلورات ترابية دقيقة. اللون أصفر (شكل ٣-٣٠د)، والبريق زجاجي، والمخدش أبيض. لا يوجد انفصام. يصل متوسط الصلادة إلى ٣، ومتوسط الوزن النوعي إلى ٤,١. يوجد كمعدن ثانوي نادر، وناتج عن تجوية معدن اليورانينيت. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، جوهانيت وجبس. يوجد المعدن برواسب رابيجاس وماسد ألاري (Mas-d'Alary) بفرنسا، ومنطقة جواكيمشتال (Joachimsthal) بجمهورية التشيك، ومنطقة لا سيروزا (La Creusa) بسويسرا.

١٠- مجموعة معادن موليبدات وتنجستات وتيلوريدات اليورانيوم

Uranium Molybdates، Tungstates and Tellurites

تعتبر معادن موليبدات اليورانيوم ذات أهمية محدودة كمعادن خامات، حيث توجد كمعادن إضافية في رواسب الرول فرونت (roll-front)، وبعض الرواسب الأخرى، كما يصاحبها تجوية لمعادن اليورانينيت، ومعادن غنية بالموليبدنيم. يوجد الموليبدنيم في هذه المعادن على الصورة السداسية (MO^{6+})، بينما يوجد اليورانيوم على الصورة الرباعية (U^{4+}) أو السداسية (U^{6+}). كلّ معادن موليبدات اليورانيوم هي معادن ثانويّة ونادرة. تعتبر معادن الكالكيورموليت (calcurmolite)، والأيريجنيت (iriginite)، والموليورانيت (moluranite)، واليوموهويت (umohoite)، أكثر المعادن المعروفة في هذه المجموعة.

هناك نوع واحد معروف لمعادن تنجستات اليورانيوم وهو يورانوتنجستيت (uranotungstite)، والموجود بمنطقتي مينيتزينشفاند (Menzenschwand)، ومنجم كلارا بالغابات السوداء (Black Forest) بألمانيا. يختلف التركيب الكيمائي للمعدن من المنطقتين، حيث يحتوي المعدن بمنطقة مينيتزينشفاند على نسبة متساوية من الحديد، والباريوم، والرصاص، بينما المعدن بمنجم كلارا (Clara) لا يحتوي على رصاص، ويحتوي على نسبة شحيحة من الباريوم.

هناك ثلاثة معادن معروفة لتيلوريدات اليورانيوم: كليفوردايت (Cliffordite)، وموكيتزيوميت (Moctezumite)، وشميتيريت (Shcmitterite). توجد هذه المعادن بمناجم ميجويل (Miguel)، وبمنطقة موكيتزيوما (Moctezuma) بالمكسيك، تم التعرف على الشميتيريت بمنجم شينكولوبوي (Shinkolobwe) بالكونغو. توجد هذه المعادن بمناطق أكسدة معادن الكبريتيدات الغنية بالتيليريوم (Te). وتتميز معادن التيليوريدات بكونها لا مائية.

كالكيورموليت Calcurmolite $Ca(UO_2)_3(MoO_4)_3(OH)_2 \cdot 11H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٣م، ويرجع اسمه إلى تركيبه الكيميائي من الكالسيوم (CALCium)، واليورانيوم (URanium)، والموليبدينم (MOLybdenum). يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، وتوجد البلورات على شكل تجمعات صفائحية، أو شعاعية، أو على شكل بلورات كروية، أو ترابية. اللون أصفر عسلي (شكل ٣-٣١أ)، والبريق ترابي، والمخدش أصفر شاحب. لا يوجد انفصام. تتراوح الصلادة بين ٢ و ٣، والوزن النوعي غير معلوم. يوجد كمعدن ثانوي ناتج عن أكسدة رواسب اليورانيوم، والموليبدنم. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، ويورانوفان، ويورانوسبينايت، وهالويسايت، وجاروسايت (jarosite)، وفيريموليبدايت (ferrimolybdite)، ويوموهويت. يوجد المعدن

برواسب كادزهاران (Kadzharan) للموليبدينم بمنطقة كافان (Kafan)، أرمينيا، ورواسب كيزيلساي لليورانيوم والموليبدنم بمنطقة بالخاش الجنوبيّة الغربيّة، كازاخستان، وفي قرية تونجبيجوان (Tongbiguan)، شركة ينجيانج (Yingjiang Co.)، وإقليم يونان (Yunnan)، الصّين، ورواسب اليورانيوم بمنطقة رابيجاس وماسد ألاري (Mas-d'Alary) بفرنسا.

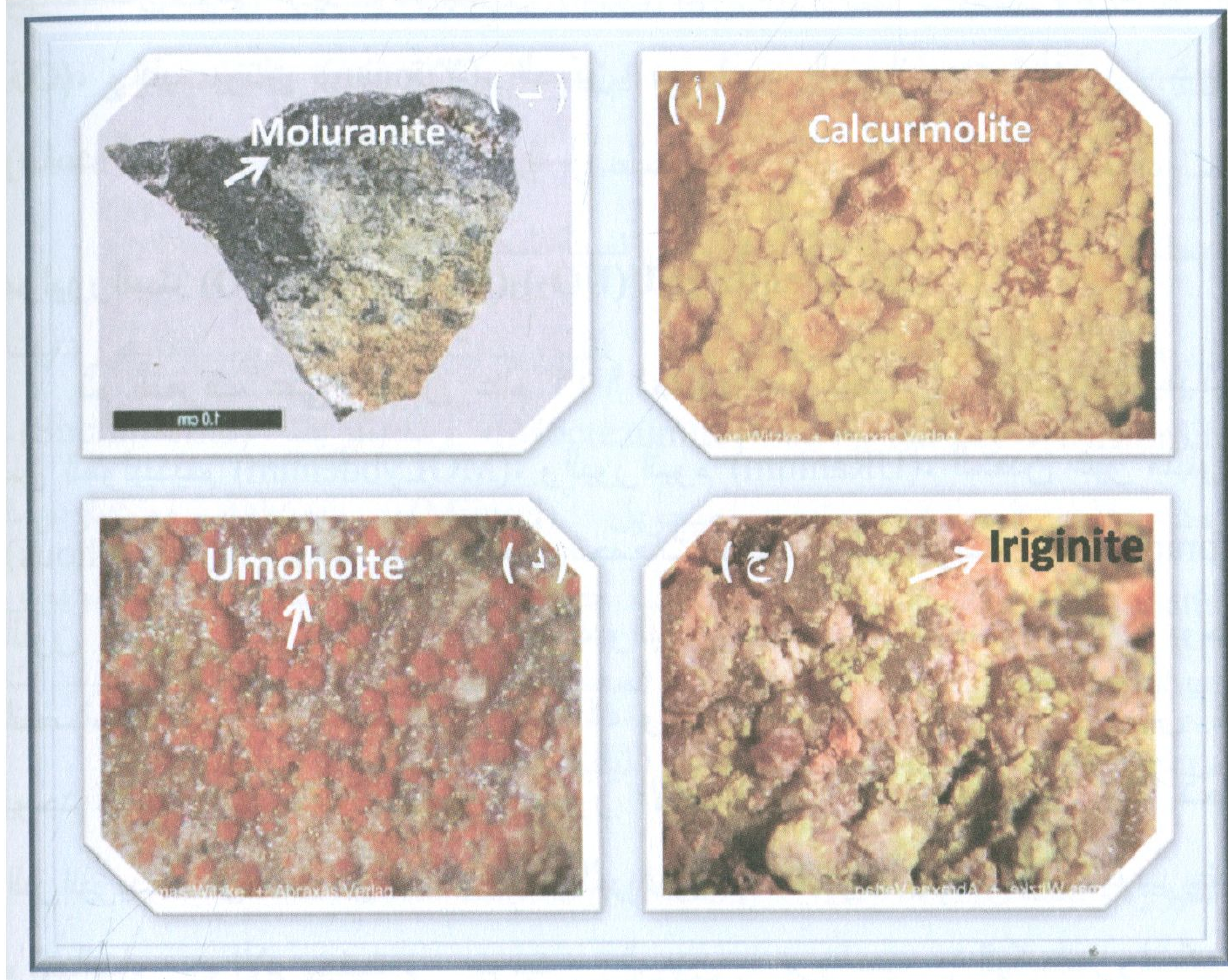
موليورانيت Moluranite $H_4U(UO_2)_3(MoO_4)_7 \cdot 18(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٩م، ويرجع اسمه إلى تركيبه الكيميائي من الموليبدينم (MOLybdenum)، واليورانيوم (URanium). المعدن غير متبلور (amorphous)، ويوجد على شكل تجمعات بمعدن البرانيريت (brannerite). اللون أسود إلى بني (شكل ٣-٣١ب)، والبريق صمغي، والمخدش بني. لا يوجد انفصام. تتراوح الصلادة بين ٣ و ٤، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٤. يوجد كمعدن مصاحب للكسور بصخور الألبيت الحبيبي، حيث يحل جزئياً محل البرانيريت. من المعادن المصاحبة: البرانيريت، والموليبدينيت، والكالكوبيريت، والجالينا، والإيريجنيت. يوجد المعدن برواسب اليكساندروفسكيي (Aleksandrovskii) لليورانيوم، والموليبدنم بمنطقة ترانسبيكال (Transbaikal) الشمالية، روسيا.

أيريجنيت Iriginite $(UO_2)Mo_2O_7 \cdot 3(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٦م. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل تجمعات دقيقة التحبب. اللون أصفر كناري (شكل ٣-٣١ج)، والبريق زجاجي إلى قاتم، والمخدش أصفر فاتح. لا يوجد انفصام.

تتراوح الصلادة بين ١ و ٢، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٣,٨٤. يوجد كمعدن مصاحب لصخور الألبيت الحبيبي، حيث يحل جزئياً محل البرانيريت.



شكل ٣-٣١: (أ) تجمعات كروية صفراء اللون من الكالكيورموليت من منجم رابيجاس بفرنسا. (ب) موليورانيت أسود رمادي غامق يغطي حجر رملي من منجم لا سال La Sal، ولاية يوتا، الولايات المتحدة الأمريكية. (ج) تجمعات صفراء اللون من الإريجنيت بمنطقة كاميرون بولاية أريزونا، الولايات المتحدة الأمريكية. (د) يوموهويت من منجم رابيجاس بفرنسا.

من المعادن المصاحبة: فيريموليبديت، وإيلسيمانيت، وميتا-يورانوسيرسيت، والجبس. ينتشر المعدن بنسبة لا بأس بها ببعض الرواسب، مثل اليكساندروفسكي (Aleksandrovskii) لليورانيوم والموليبدنم بمنطقة ترانسبيكال (Transbaikal) الشمالية، روسيا. كما يوجد في جبال شناك، على بعد ٦٠ كيلومترًا غربًا من محطّة قطار موينتاي (Mointy)، وفي رواسب كيزيلساي

(Kyzylsai) لليورانيوم والموليبدنم، منطقة بالخاش الجنوبيّة الغربيّة، كازاخستان، وفي رواسب رابيجاس لليورانيوم، على بعد سبعة كيلومترات جنوبًا جنوب شرق لوديفي (Lod`eve)، هارولت (Hérault)، فرنسا. وفي الولايات المتّحدة الأمريكيّة، في منطقة هارت تابل (Hart Table)، جنوب غرب ساينك (Scenic)، شركة بينينجتون (Pennington)، ساوث داكوتا، أريزونا، وفي ملكيّة كلايد لونج (Clyde Long)، منطقة إيلك بارك (Elk Park)، شركة سان جوان (San Juan)، كولورادو. منجم شينكولوبوي، إقليم شابا، الكونغو. وفي رواسب هرفيس رينج (Hervey's Range)، على بعد ٥٥ كيلومترًا غرب تاونزفيل (Townsville)، كوينسلاند (Queensland)، استراليا.

يوموهويت Umohoite $(UO_2)(MoO_4)\cdot(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٥٣م. يتبلور المعدن بفصيلة الميول الثلاثة، حيث توجد البلورات على شكل صفائحي عمداني، أو على شكل وردي، أو كتلي، أو عروق صغيرة، أو بلورات منبثة. اللون أسود مزرق، أخضر غامق إلى أسود (شكل ٣-٣١د)، والبريق شبه فلزي، والمخدش رمادي مزرق. لا يوجد انفصام. يصل متوسط الصلادة إلى ٢ والوزن النوعي إلى ٤,٧٤.

يوجد كمعدن ثانوي نادر مصاحب لرواسب اليورانيوم بالصخور الرسوبية، حيث يتكون بنطاق الأكسدة الذي يعلو منسوب الماء الجوفي. من المعادن المصاحبة: يورانينيت، وفيريموليبديت، وإيلسيمنيت، وجورديسيت (jordisite)، وإيريجينيت، وشوبيت، ويورانوفان، ورازفوردين، وكالكيرموليت، وفلوريت، وبيريت، وجبس، وكوارتز. يوجد المعدن بالولايات المتّحدة الأمريكيّة، ومنجم فريدام رقم ٢ (Freedom)، ماريسفال، ومنطقة أوهايو، يوتا، وفي منجم لاكي إم سي (Lucky Mc)، جاس هيل، شركة فريمونت، وايومينج (Wyoming)، وفي منجم أليس تولينو (Alyce Tolino)، ومنطقة كاميرون، أريزونا، ومنجم

شينكولوبوي، إقليم شابا، الكونغو. رواسب رابيجاس لليورانيوم، على بعد سبعة كيلومترات جنوبًا، جنوب شرق لوديفي (Lodève)، وهارولت (Hérault)، فرنسا. وفي رواسب كيزيلساي (Kyzylsai) لليورانيوم والموليبدنم، ومنطقة بالخاش الجنوبيّة الغربيّة، كازاخستان. بالإضافة إلى أماكن غير محددة في الاتحاد السوفيتي السّابق .

يورانوتنجيستيت Uranotungstite $Fe^{2+}_{0.6}Ba_{0.3}Pb_{0.1}(UO_2)_2(WO_4)(OH)_4{\cdot}12(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٨٥م. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، حيث توجد البلورات على شكل نصلي، أو على شكل بلورات كروية، أو ترابية. اللون بني، أصفر، بني مصفر إلى برتقالي (شكل ٣-٣٢)، والبريق ترابي إلى قاتم، والمخدش أصفر. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]. يصل متوسط الصلادة إلى ٢، والوزن النوعي إلى ٤,٢٧. يوجد كمعدن ثانوي مصاحب للرواسب متعددة الفلزات القاعدية (polymetallic base metal deposits). من المعادن المصاحبة: ميتا-يورانوسيرسيت، وميتاهينريشيت، وبيرجينيت، وميتا-توربيرنيت، وميتا-زوينيريتشوبيت، وكوارتز. يوجد المعدن بمنجم مينيتسينشفاند



شكل ٣-٣٢: يورانوتنجيستيت من منجم مينيتسينشفاند Menzenschwand، الغابات السوداء، ألمانيا.

(Menzenschwand)، ومنجم كلارا، بالقرب من أوبيروولفاش (Oberwolfach)، الغابات السوداء، ألمانيا.

كليفورديت Cliffordite UTe_3O_9

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٩م، ويرجع اسمه إلى تكريم العالم كليفورد فرونديل (Clifford Frondel) من جامعة هارفارد بالولايات المتحدة الأمريكية. يتبلور المعدن بفصيلة المكعب، حيث توجد البلورات على شكل ثماني الأوجه، أو على شكل ترابي. اللون أصفر مخضر (شكل ٣-٣٣أ)، والبريق صمغي، والمخدش أصفر فاتح. لا يوجد انفصام. يصل متوسط الصلادة ٤، والوزن النوعي ٦,٥٧. المعدن نادر الوجود على شكل قشور بنطاق الأكسدة لرواسب تيلوريدات الذهب والفضة الحرمائية. من المعادن المصاحبة: ماكيايت (mackayite)، وباريت، وكوارتز، وليمونيت، وباراتيلرايت (paratellurite). يوجد المعدن بمنجم بامبولا (Bambolla)، على بعد ١٢ كيلومترًا جنوب موكتيزوما (Moctezuma)، سونورا (Sonora) ، المكسيك.

موكتيزوميت Moctezumite $Pb(UO_2)(TeO_3)_2$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٥م، ويرجع اسمه إلى مكان وجوده بمنجم موكتيزوما بالمكسيك. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، حيث توجد البلورات على شكل نصلي، أو على شكل تجمعات شبه متوازية، وعلى شكل وردي. اللون برتقالي إلى برتقالي بني (شكل ٣-٣٣ب)، والبريق ترابي والمخدش برتقالي. الانفصام جيد وتام بالمستوى [100]. يصل متوسط الصلادة ٣، والوزن النوعي ٥,٧٣. المعدن نادر الوجود على شكل قشور بنطاق الأكسدة لرواسب تيلوريدات الذهب الحرمائية. من المعادن المصاحبة: شميتيرايت

(Schmitterite)، وبركهاردتايت (Burckhardtite)، وزيمانايت (Zemannite)، وإمونسايت (Emmonsite)، وبيريت، وباريت، وليمونيت. يوجد المعدن بمنجم بامبولا (Bambolla)، على بعد ١٢ كيلومترًا جنوب موكتيزوما (Moctezuma) ، سونورا (Sonora) ، المكسيك.



شكل ٣-٣٣: (أ) بلورات صفراء مخضرة اللون لمعدن الكليفورديت من منجم كانديلاريا (Candelaria)، موكتيزوما، المكسيك. (ب) بلورات برتقالية اللون لمعدن الموكتيزوميت من منطقة موكتيزوما بالمكسيك.

١١- مجموعة معادن سالينيدات اليورانيوم

Uranium Selenites

توجد معادن هذه المجموعة بمناطق أكسدة وتغاير الكبريتيدات الغنية بعنصر السيلينيوم. ويوجد السيلينيوم بهذه المعادن على الصورة الرباعية (Se^{IV})، على شكل أيون السيلينيت (selenite SeO_3^{2-}). وتوجد معظم معادن سالينيدات اليورانيوم برواسب موزونوي (Musonoi) بجنوب شابا (Shaba) بالكونغو، حيث ينتج السيلينيوم عن أكسدة الديجنيت الغني بالسيلينيوم (seleniferous digenite). ومن أهم معادن هذه المجموعة: معدن

الديميسماكيريت (demesmaekerite)، والديريكسيت (derriksite)، والجويلمينيت (guilleminite)، والبيرتيت (piretite)، والهاينيسيت (haynesite)، والمارثوزيت (marthozite).

ديميسماكيريت Demesmaekerite $Pb_2Cu_5(UO_2)_2(SeO_3)_6(OH)_6\cdot 2(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٥م، ويرجع اسمه إلى جيولوجي المناجم البلجيكي جاستون ديميسماكير (Gaston Demesmaeker)، الذي قام بدراسة رواسب اليورانيوم بمنجم شينكولوبوي بالكونغو. يتبلور المعدن بفصيلة الميول الثلاثة، وتوجد بلوراته على شكل مستطيل مخطط، أو على شكل تجمعات شعاعية. اللون بني، أو أخضر بني إلى أخضر (شكل ٣-٣٤أ)، والبريق قاتم. لا يوجد انفصام. تتراوح الصلادة بين ٣ و ٤، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٥,٢٨. المعدن نادر الوجود بنطاق الأكسدة لرواسب سالينيدات الذهب والنحاس. من المعادن المصاحبة: كبروسكلودووسكيت، كاسوليت، وليمينيت، ديريكسيت، شالكومينيت، ملاكيت، ديجينيت غني بالسيلينيوم. يوجد المعدن بمنجم مسونوي (Musonoi) للكوبالت والنحاس، بالقرب من كولويزي (Kolwezi)، إقليم شابا، الكونغو.

ديريكسيت Derriksite $Cu_4(UO_2)(SeO_3)_2(OH)_6$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٧١م، ويرجع اسمه إلى جيولوجي المناجم البلجيكي جوسيف ديريكس (Joseph Derriks)، الذي قام بدراسة رواسب

اليورانيوم بمنجم شينكولوبوي بالكونغو. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد بلوراته على شكل وتد، أو على شكل قشور. اللون أخضر (شكل ٣-٣٤ب)، والبريق زجاجي. الانفصام جيد وتام بالمستوى [010]. الصلادة غير معلومة، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٤,٧٢. المعدن نادر الوجود، حيث يوجد بنطاق الأكسدة لرواسب سالينيدات الذهب والنحاس. من المعادن المصاحبة: ديميسمايكيريت، شالكومينيت (chalcomenite)، ملاكيت، ديجينيت غني بالسيلينيوم. يوجد المعدن بمنجم مسونوي (Musonoi) للكوبالت والنحاس، بالقرب من كولويزي (Kolwezi) ، إقليم شابا، الكونغو.

جويلمينيت Guilleminite $Ba(UO_2)_3(SeO_3)_2O_2 \cdot 3(H_2O)$

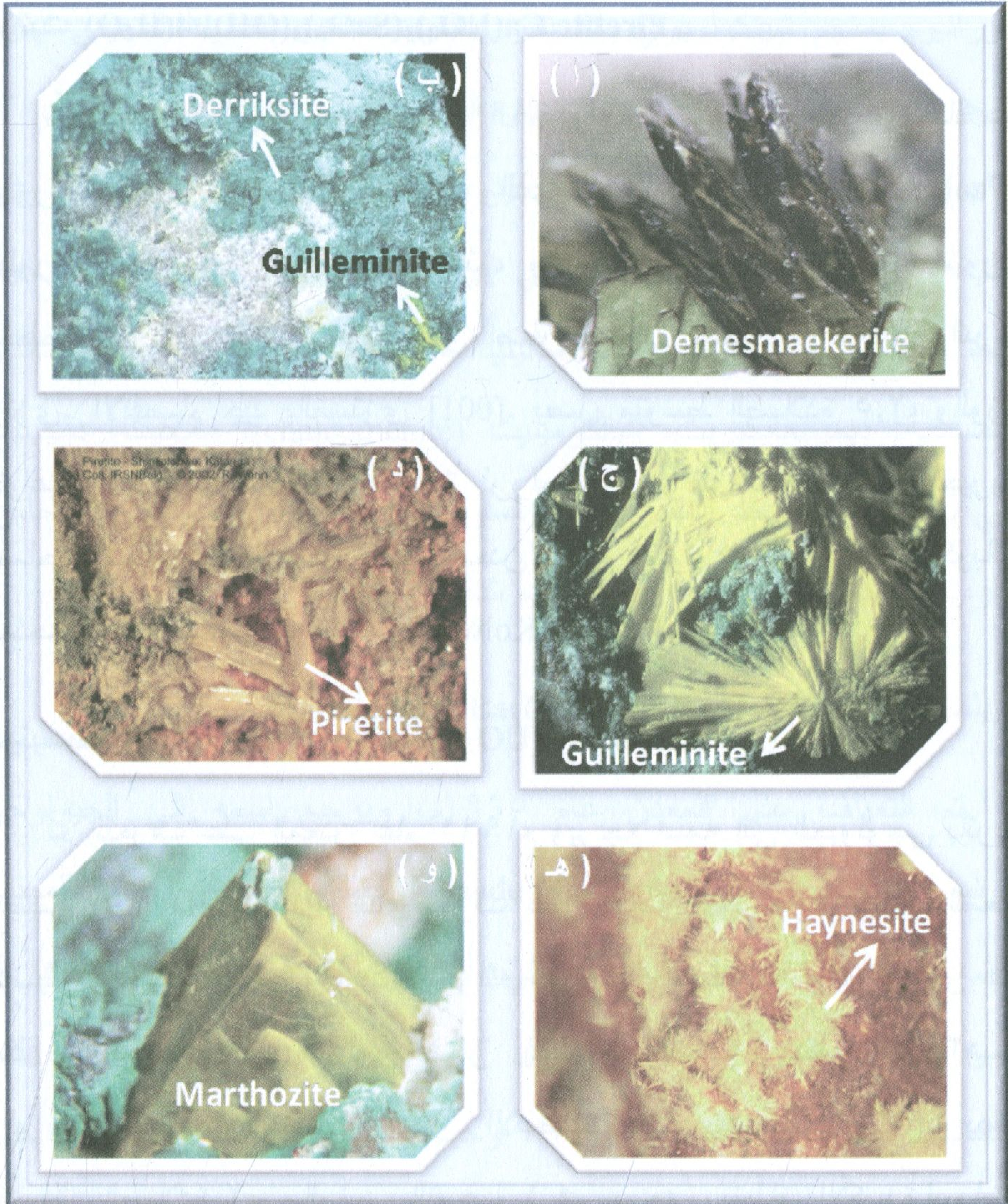
تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٥م، ويرجع اسمه إلى الجيولوجي الفرنسي كلاود جويلمين (Claude Guillemin). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد بلوراته على شكل عمداني، أو على شكل قشور، أو كتل حريرية. اللون أصفر مخضر إلى أصفر (شكل ٣-٣٤ج)، والبريق زجاجي إلى قاتم. الانفصام جيد وتام بالمستوى [100]، وجيد بالمستوى [010]. الصلادة غير معلومة، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٤,٨٨. يوجد بنطاق الأكسدة لرواسب سالينيدات الذهب والنحاس. من المعادن المصاحبة: ملاكيت، وكبروسكلودووسكيت، وكاسوليت، ومارثوزايت، وديريكسيت، ويورانوفان، ولفينيت (wulfenite). يوجد المعدن بمنجم مسونوي (Musonoi) للكوبالت والنحاس، بالقرب من كولويزي (Kolwezi)، إقليم شابا، الكونغو.

بيرتيت Piretite $Ca(UO_2)_3(SeO_3)_2(OH)_4{\cdot}4(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٩٦م، ويرجع اسمه إلى تكريم أستاذ علم البلورات بجامعة كاسوليك ببلجيكا، والذي يدعى باول بريت (Paul Piret). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد بلوراته على شكل منشوري مخطط، أو على شكل إبري. اللون أصفر ليموني (شكل ٣-٣٤د)، والبريق لؤلؤي. الانفصام جيد بالمستوى [001]. يصل متوسط الصلادة ٢,٥، والوزن النوعي ٤. يوجد بنطاق الأكسدة لرواسب اليورانيوم بالصخور الجيرية. يصاحب معدن اليورانينيت. يوجد المعدن بمنجم مسونوي (Musonoi) للكوبالت والنحاس، بالقرب من كولويزي (Kolwezi) ، إقليم شابا، الكونغو.

هاينيسيت Haynesite $(UO_2)_3(SeO_3)_2(OH)_2{\cdot}5(H_2O)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٩١م ويرجع اسمه إلى الجيولوجي باتريك هاينيس (Patrick Haynes) الذي تعرف على المعدن لأول مرة. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد بلوراته على شكل عمداني، أو إبري، أو على شكل وردي (rosettes). اللون أصفر بني إلى أصفر (شكل ٣-٣٤هـ)، والبريق زجاجي، والمخدش أبيض. الانفصام جيد بالمستوى [010]. يصل متوسط الصلادة ٢، والوزن النوعي ٤,١. يوجد بنطاق الأكسدة لرواسب اليورانيوم بالصخور الطينية والرملية. من المعادن المصاحبة: أنديرسونيت، وبولتووديت، وفيروسيلايت، وجبس، وباريت، وكالسيت. يوجد المعدن بمنجم ريبيت (Repete)، على بعد ٣٤ كيلومترًا تجاه الجنوب الشّرقيّ بلانديج (Blanding)، يوتا، الولايات المتّحدة الأمريكيّة.



شكل ٣-٣٤: (أ) بلورات عمدانية ذات لون أخضر غامق لمعدن الديميسماكيريت من منجم ميزوني، إقليم شابا، الكونغو. (ب) صحبة من الديريكيست وال جويلمينيت (أصفر اللون من منجم ميزوني، إقليم شابا، الكونغو (www.mineralatlas.com). (ج) بلورات إشعاعية وإبرية لمعدن ال جويلمينيت على معدن الملاكيت من منجم ميزوني، إقليم شابا، الكونغو. (د) بلورات عمدانية لمعدن البيرتيت من منجم شينكولوبوي، إقليم شابا، الكونغو(/www.agab.be mineralogie/Katanga/piretite.html). (هـ) بلورات إبرية من معدن الهاينيسيت من منجم ريبيت بولاية يوتا، الولايات المتحدة الأمريكية. (و) بلورات معينية الشكل لمعدن المارثوزيت من منجم ميزوني، إقليم شابا، الكونغو.

مارثوزيت Marthozite $Cu(UO_2)_3(SeO_3)_3(OH)_2 \cdot 7H_2O$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٦٩م، ويرجع اسمه إلى عالم علم المعادن الفرنسي أيم مارثوز (Aime Marthoz). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد بلوراته على شكل تجمعات نصلية الشكل. اللون بني مخضر إلى أخضر مصفر (شكل ٣-٣٤و). الانفصام جيد وتام بالمستوى [100]، وغير مميز بالمستوى [010]. يصل متوسط الصلادة ٦، والوزن النوعي ٤,٤٤. يوجد بنطاق الأكسدة لرواسب اليورانيوم. من المعادن المصاحبة: ديميسمايكيريت، وشالكومينيت (chalcomenite)، وملاكيت، وجويليمينيت، وديجنيت غني بالسيلينيوم. يوجد المعدن بمنجم ميزوني، إقليم شابا، الكونغو.

١٢- مجموعة معادن نيوبات، تانتالات وتيتانات اليورانيوم

Uranium niobates، tantalates and titanates

معادن اليورانيوم في هذه المجموعة، هي أكاسيد متعدّدة ويمكن اعتبارها معادن أولية. يتراوح محتوى اليورانيوم في هذه المعادن من أقل من واحد في المائة إلى ما يزيد عن ٤٠ في المائة في بعض منها. توجد هذه المعادن كمعادن إضافية بالصخور الجرانينية، والبيجماتيت الجرانيتي. تعتبر هذه المعادن مصدرًا أساسيًا لعناصر التنتالوم، والنيوبيوم، والتيتانيوم، والعناصر الأرضية النادرة، بالإضافة إلى اليورانيوم. تكون هذه المعادن عادةً في صورة محطمة إشعاعياً (metamict)، ومجواه إلى درجة كبيرة. أهمّ معادن المجموعة هي: البيروكلور (pyrochlore)، والبيتافيت (betafite)، والبرانيريت (brannerite)، والدافيديت (davidite)، والإيوكسينيت (euxenite)، والإيشيكاويت (ishikawaite)، والبوليكراس (polycrase)، والسامارسكيت (samarskite).

بيروكلور Pyrochlore $(Na,Ca)2Nb_2O_6(OH,F)$

تم تسميه المعدن عام ١٨٢٦م، عن الكلمة اليونانية التي تعني نار، أو أخضر "fire and green"، ويرجع ذلك إلى أن بعض العينات تتحول إلى اللون الأخضر بالتسخين. يطلق الاسم على مجموعة من المعادن، وليس معدناً واحدًا. تتكون هذه المجموعة من أكاسيد النيوبيوم والتنتالوم، والتي يصعب في بعض الأحيان التمييز بينهما. يتبلور المعدن في فصيلة المكعب، ويكوّن بلورات ثمانية الأوجه. يمثل المعدن أحد طرفي سلسلة محلول-صلب (solid solution)، طرفها هو البيروكلور والطرف الأخر معدن الميكروليت (microlite). اللون أصفر، بني محمر، أحمر أو أسود (شكل ٣-٣٥أ). المعدن شبه شفاف إلى معتم. يتغير البريق من زجاجي إلى صمغي. الانفصام جيد في أربعة اتجاهات، ولكن يصعب تمييزها. الصلادة = ٥-٥,٥، والوزن النوعي = ٣,٥-٤,٦. المخدش أصفر شاحب إلى بني. من المعادن المصاحبة: كالسيت، وفلسبار، وأباتيت، وزركون، وبيوتيت، وبيتافيت، ومعادن يورانيوم ثانوية أخرى. من أهم مناطق وجوده: روسيا، وتنزانيا، وأمريكا، والنرويج، والسويد، وكندا. كما تم التعرف على المعدن بالصخور الجرانيتية بمنطقة العرضية، الصحراء الشرقية بمصر (Abd El-Naby, 2008).

بيتافيت Betafite $(Ca,U)_2(Ti,Nb,Ta)_2O_6(OH)$

تم التعرف على المعدن عام ١٩١٢م، ويرجع اسمه إلى مكان التعرف علية بالقرب من منطقة بيتافو Betafo بمدغشقر. يتبلور المعدن بفصيلة المكعب، يظهر عادةً في صورة بنية محطمة نتيجة النشاط الإشعاعي. توجد بلورات المعدن على شكل ثماني الأوجه، وبعض البلورات تكون ذات استطالة. اللون بني، أسود، أخضر بني، أصفر إلى أسود مخضر (شكل ٣-٣٥ب). لا يوجد

انفصام، والمخدش أبيض مصفر. تتراوح الصلادة بين ٥ و ٥,٥، ويصل متوسط الوزن النوعي ٤,٣. يوجد كمعدن أولي بصخور الجرانيت، والبيجماتيت جرانيت، وبدرجة أقل بصخور الكربوناتيت، وأيضاً كحبيبات منقولة برواسب الركام. من المعادن المصاحبة: الثوريت، والألانايت، والزركون، والبيريل، والتيتانيت، والماجنيتيت، والبيوتيت، والميكروكلين، والكوارتز. يوجد المعدن كبلورات كبيرة في عدد من الأماكن بمدغشقر، منها أمبولوتارا (Ambolotara)، غرب منطقة بيتافو، ومناطق أمباتولامبيكيلي (Ambatolampikely)، وأمباتوفوتسي (Ambatofotsy)، وأمباتومبو-هانجي (Ambatomboahangy)، وأمبالاهازو (Ambalahazo)، وتومبوريفو (Tomboarivo)، وأنتانيفوتسي (Antanifotsy). في النّرويج، منطقة هوسجييان (Höysjaen) بالقرب من كريجر Kragerø، محجر لاندسفيرك (Landsverk) بالقرب من إفجي (Evje)، ومنطقة لجوسلاند (Ljosland). منطقة سليوديانكا (Slyudyanka)، سيبيريا، روسيا. منجم سيلفر كريتر (Silver Crater)، أونتاريو (Ontario)، وفي أماكن أخرى بكندا. في الولايات المتحدة الأمريكية، بصخور البيجماتيت بمنطقة براون ديربي (Brown Derby)، كولورادو، وفي بيجماتيت بيدلايت (Pidlite) ، نيوميكسيكو، ومن جبال كادي (Cady)، كاليفورنيا. كما تم التعرف على المعدن بالصخور البركانية بمنطقة العطشان، الصحراء الشرقية بمصر (Abd El-Naby, 2009b).

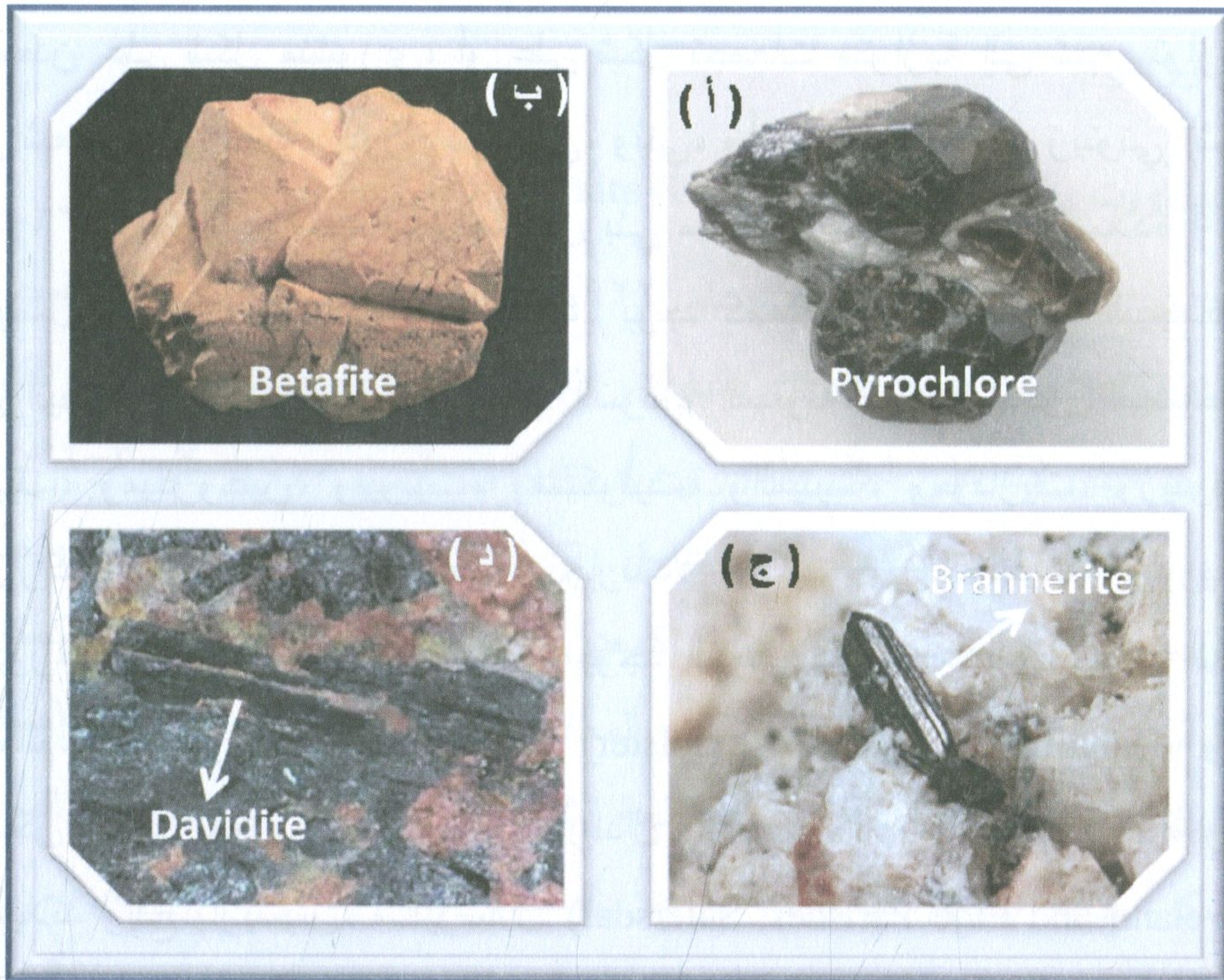
برانيريت Brannerite (U,Ca,Ce)(Ti,Fe)$_2$O$_6$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٠م، ويرجع اسمه إلى تكريم الجيولوجي الأمريكي كاسبر برانير (Casper Branner)، بجامعة ستانفورد (Stanford) بالولايات المتحدة الأمريكية. يتبلور المعدن بفصيلة الميل الواحد، يظهر عادةً في صورة بنية محطمة نتيجة النشاط الإشعاعي. توجد بلورات المعدن على شكل

منشور ثماني الأوجه، وبعض البلورات تكون على شكل حبيبات مستديرة، وأيضاً على شكل كتلي. اللون بني، أخضر بني، أصفر، بني مصفر إلى أسود (شكل ٣-٣٥ج). لا يوجد انفصام، والمخدش بني مخضر غامق. تتراوح الصلادة بين ٤ و ٥، ويصل متوسط الوزن النوعي ٥,٤٢. يوجد كمعدن أولي بصخور النايس جرانيت، والبيجماتيت جرانيت، وصخور حصى الكونجلميرات، وفي الكوارتز الناتج عن فعل المحاليل الحرمائية، وعروق الكالسيت، وأيضاً كحبيبات منقولة برواسب الركام. يوجد البرانيريت بصخور البيجماتيت، والرواسب المتكونة حول العيون الحرمائية. كما تم التعرف عليه برواسب اليورانيوم من نوع عدم التوافق (unconformity-Type) (Finch, 1994). من المعادن المصاحبة: اليورانينيت، الذهب، الروتيل، الزينوتيم، الأباتيت والزركون. يوجد المعدن في الولايات المتحدة الأمريكية: منطقة كيلي جلوش (Kelly Gulch)، شركة كستر (Custer)، أيداهو (Idaho)، في جبال سان بيرناردينو (San Bernardino) وتقريبًا على بعد عشرة كيلومترات جنوب كوليفيل (Coleville)، كاليفورنيا، في منجم كاليفورنيا، كولورادو. في كندا، يوجد المعدن بصخور كونجلميرات حبيبات الكوارتز بمنجم برونتو (Pronto)، ومقاطعة بليند ريفر (Blind River). كما يوجد بصخور البيجماتيت بمنطقة قرطبة (Cordoba) بأسبانيا. وفي شاتيو-لامبرت (Chateau-Lambert)، فوجيز (Voges)، فرنسا. وفي هييتينبيرج (Hiittenberg)، كارينثيا (Carinthia)، النمسا. كما وجد المعدن في لينجينباخ (Lengenbach)، وبيننتال (Binntal)، وفاليس Valais، سويسرا، وفي المغرب، منطقة بو-عازر (Bou-Azzer)، ومنطقة ويتواتيرسراند (Witwatersrand) بجنوب إفريقيا، وفي جنوب استراليا، منطقة كروكر ويل (Crocker's Well)، بالقرب من مانا هيل (Manna Hill)، ومنجم نحاس نيكولز نوب (Nichols Nob). بالإضافة إلى أماكن أخرى قليلة معروفة.

دافيديت Davidite $(La,Ce,Ca)(Y,U)(Ti,Fe^{3+})_{20}O_{38}$

تم التعرف على المعدن عام ١٩٠٦م، ويرجع اسمه إلى الجيولوجي الاسترالي وليم إدجيورث (Edgeworth David). يتبلور المعدن بفصيلة السداسي، يظهر عادةً في صورة بنية محطمة نتيجة النشاط الإشعاعي. توجد بلورات المعدن على كتل مستطيلة. اللون أسود، وأسود مخضر، وأسود بني إلى محمر (شكل ٣-٣٥د). لا يوجد انفصام، والمخدش أسود بني. يصل متوسط الصلادة ٦، ويصل متوسط الوزن النوعي ٤,٤٢. يوجد كمعدن أولي بقواطع



شكل ٣-٣٥: (أ) بـيروكلـــور (www.dkimages.com/.../Pyrochlore-Microlite-1.html). (ب) تجمعات بلورية لمعدن البيتافيت من منجم تومبواريفو Tomboarivo بمدغشقر (www.spathfluorminerals.com) (ج) بلورة منشورية لمعدن البرانيريت من منطقة إيراجنا Iragna بسويسرا. (د) بلورات منشورية لمعدن الدافيديت بصخر الكربوناتيت من منطقة ثاكيرينج Thackering باستراليا.

البيجماتيت، وصخور الجرانيت. من المعادن المصاحبة: المينيت، وروتيل، وجادولينيت (gadolinite)، وأوكسينيت، وزينوتيم، وألانيت، وزركون. يوجد المعدن في منطقة تفتان، إيفيلاند، النرويج (Tuftane, Iveland, Norway).

إيوكسينيت Euxenite $(Y,Ca,Ce)(Nb,Ta,Ti)_2O_6$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٠م، ويرجع اسمه إلى اليونانية، والتي تعبر عن محتواه من العناصر النادرة. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، يظهر عادةً في صورة بنية محطمة نتيجة النشاط الإشعاعي. توجد بلورات المعدن على شكل منشوري، أو على شكل تجمعات متوازية إلى شبه متوازية، أو شعاعية، أو كتلية. اللون أسود بني، وبني، وأصفر إلى أخضر زيتوني (شكل ٣-٣٦أ). لا يوجد انفصام، والمخدش بني محمر. يصل متوسط الصلادة ٦,٥، ويصل متوسط الوزن النوعي ٤,٨٤. يوجد كمعدن أولي بصخور البيجماتيت جرانيت وكمكون برواسب الرمال السوداء المنقولة. من المعادن المصاحبة: البيت، وميكروكلين، وبيوتيت، ومسكوفيت، والمينيت، ومونازيت، وزينوتيم، وزركون، وبيريل، وماجنيتيت، وجارنت، وألانيت، وجادولينيت، وثوريت، ويورانينيت، وبيتافيت، وكولومبيت. يوجد المعدن بأماكن عديدة في كلّ أنحاء العالم. في النّرويج، من جولستير (Jölster)، سوندفورد (Söndfjord)، وفي أماكن أخرى تقع بين تفيديستراند وأرندال (Tvedestrand and Arendal)، وفي إيفيلاند وإفج باريشيس، ساتيرسدال (Iveland and Evje Parishes, Sätersdal). في السويد، رواسب الحديد والتيتانيوم بمنطقة الروتيفير (Ruoutevare)، بالقرب من كفيكجوك (Kvikkjokk)، نوربوتين (Norrbotten). في روسيا منطقة هنتيلا (Huntila) وكاريليا (Karelia). في مدغشقر، بلورات كبيرة من فوهيماسينا (Vohimasina)، أمباتوفوتسيكيلي (Ambatofotsikely)، أنكازوب (Ankazobe)،

بالقرب من أمبوهيتانتيلي Ambohitantely، أمبولوتارا (Ambolotara)، رانومافانا (Ranomafana)، وفي أماكن أخرى. في البرازيل، من سانتا كلارا وبومبا وإسبيريتو سانتو، ميناس جيريس (Santa Clara, Pomba, and Espirito Santo, Minas Gerais). في كندا، من مناطق ليندوتش، وسابين، وماتوان تاونشيم (Lyndoch, Sabine, and Mattawan Townships) ومناطق عديدة أخرى بولاية أنتاريو وكويبيك. في الولايات المتحدة الأمريكية، من بيجماتيت روثرفورد (Rutherford)، وبيجماتيت نانكو (Nanco)، وأماكن أخرى بولاية فرجينيا، من منطقة Morton مورتون، بنسلفانيا، وبصخور الفلسبار بيجماتيت لكولورادو.

إيشيكاويت Ishikawaite $(U,Fe,Y,Ca)(Nb,Ta)O_4$

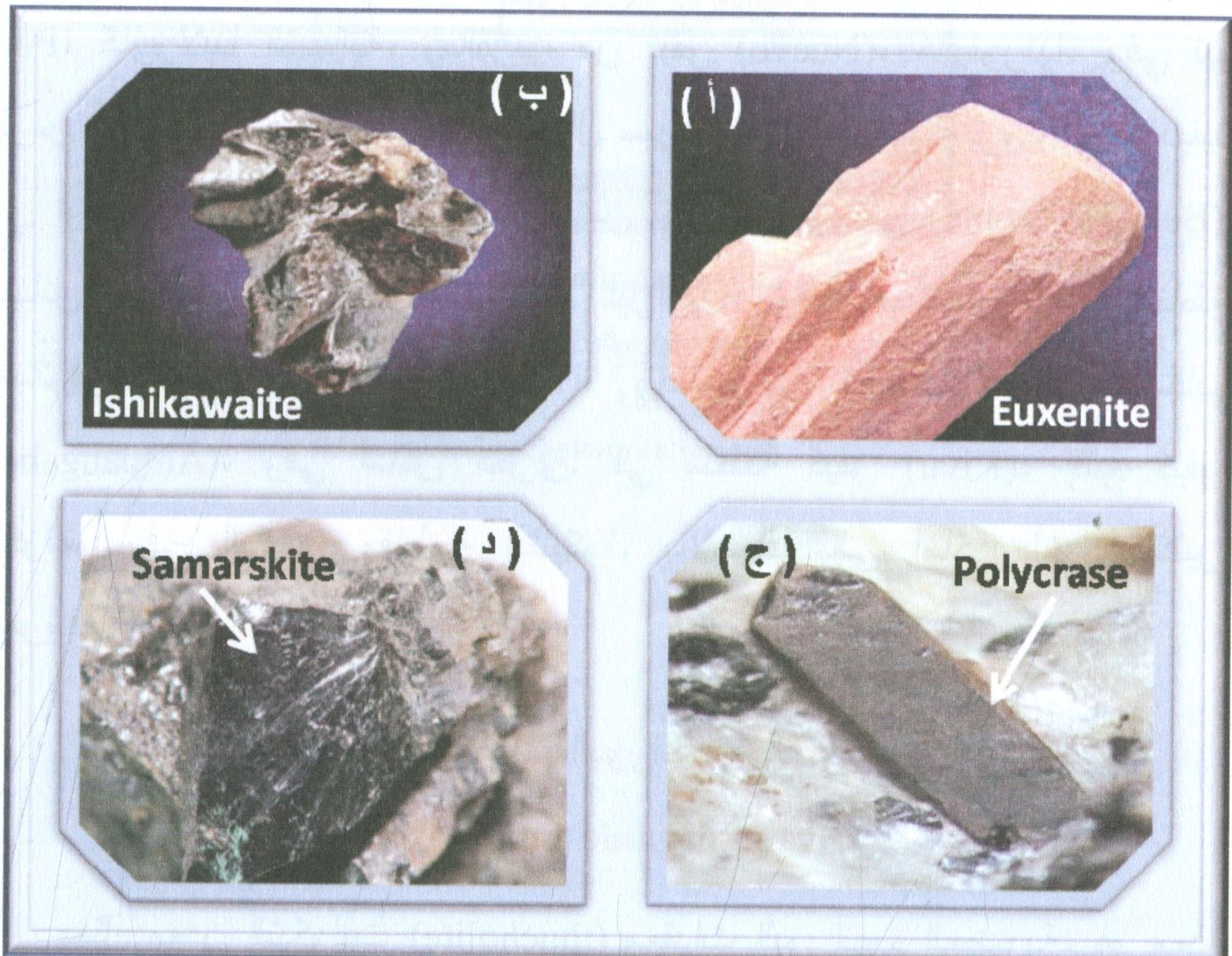
تم التعرف على المعدن عام ١٩٢٢م، ويرجع اسمه إلى مكان وجوده بمقاطعة إيشيكوا (Ishikawa) باليابان. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل منشوري، أو عمداني. اللون أسود (شكل ٣-٣٦ب). لا يوجد انفصام، والمخدش بني غامق. تتراوح الصلادة بين ٥ و ٦، ويصل متوسط الوزن النوعي ٦,٣. يوجد كمعدن أولي بصخور البيجماتيت، وكمكون لرواسب الأودية (alluvium). من المعادن المصاحبة: السمرسكيت (منطقة إيشيكوا، اليابان). بالإضافة إلى مقاطعة إيشيكوا باليابان، تم التعرف على المعدن بأماكن عديدة أخرى باليابان، ولكنّ من الصعب التأكد منه. كما تم التعرف على معدن شبيه له بمنطقة هانيكومب هيلس (Honeycomb Hills) بولاية يوتا بالولايات المتّحدة الأمريكيّة، وسمي هذا المعدن سمرسكيت غني باليورانيوم (uranoan samarskite).

بوليكراس Polycrase $(Y,Ca,Ce,U,Th)(Ti,Nb,Ta)_2O_6$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٧٠م، ويرجع اسمه إلى كلمتين إغريقيتين وتعني العديد (poly) وخليط (mixture) ويشير الاسم إلى محتوى المعدن العالي من العناصر بصيغته الكيميائية. يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل منشوري، أو تجمعات متوازية إلى شعاعية، أو على هيئة كتلية. اللون أسود إلى بني (شكل ٣-٣٦ج). لا يوجد انفصام، والمخدش بني. تتراوح الصلادة بين ٥ و ٦، ويصل متوسط الوزن النوعي إلى ٥. يوجد كمعدن أولي بصخور البيجماتيت، ونادراً بالرواسب المنقولة. من المعادن المصاحبة: جادولينيت، وكولومبيت، وزينوتيم، ومونازيت، وألانيت، وزركون، وجارنت، وبيريل، وماجنيتيت، وفلوريت. من أماكن وجوده: منطقة راسفاج، جزيرة هيدرا (Rasvåg, Hidra Island)، بالقرب من فليكيفجورد (Flekkefjord)، وأماكن أخرى كثيرة في النرويج. منطقة سلاتاكرا (Slättåkra) بالسّويد. في منطقة ليندوتش (Lyndoch Township)، وعلى بعد حوالي ثمانية كيلومترات جنوب من مابيرل (Maberl)، أونتاريو، كندا. في الولايات المتحدة الأمريكية، من منطقة زركونيا (Zirconia)، كارولاينا الشمالية، من بيجماتيت تروت جييك باز (Trout Creek Pass)، شرق بوينا فيستا (Buena Vista)، كولورادو، في بيجماتيت بارينجر هيل (Baringer Hill)، على بعد ٢٦ كيلومتر غرب من برنيت (Burnet)، تكساس. من سانتا كلارا، بالقرب من توكانتينز (Tocantins)، ميناس جيريس، البرازيل. في كوجليجونج (Cooglegong)، استراليا الغربية. ربما في أماكن كثيرة في مدغشقر، ويحتاج ذلك إلى مزيد من الدراسات لتمييزه عن الأوكسينيت الأكثر شيوعاً.

سامارسكيت Samarskite $(Y,Fe_{3+},U)(Nb,Ta)_5O_4$

تم التعرف على المعدن عام ١٨٤٧م، ويرجع اسمه إلى مهندس مناجم روسي يدعى فاسيلي سامرسكي-بيكوفيتز (Vasilii von Samarski-Bykhovets). يتبلور المعدن بفصيلة المعيني القائم، وتوجد البلورات على شكل مستطيل، أو على هيئة كتلية، أو حبيبية. اللون أسود، بني إلى بني مصفر (شكل ٣-٣٦د). الانفصام غير جيد وتام، والمخدش بني محمر. تتراوح الصلادة بين ٥ و ٦، ويصل متوسط الوزن النوعي ٥,٦٩. يوجد كمعدن إضافي بصخور



شكل ٣-٣٦: (أ) إيوكسينيت (www.mineralman.com/mineralgallery.html). (ب) بلورات كتلية لمعدن الإيشيكاويت من محجر سبينيلي بالولايات المتحدة الأمريكية. (ج) بلورة منشورية لمعدن البوليكراس من بيجماتيت سلوبريكا بالنرويج. (د) سامارسكيت (www.uraniumminerals.com).

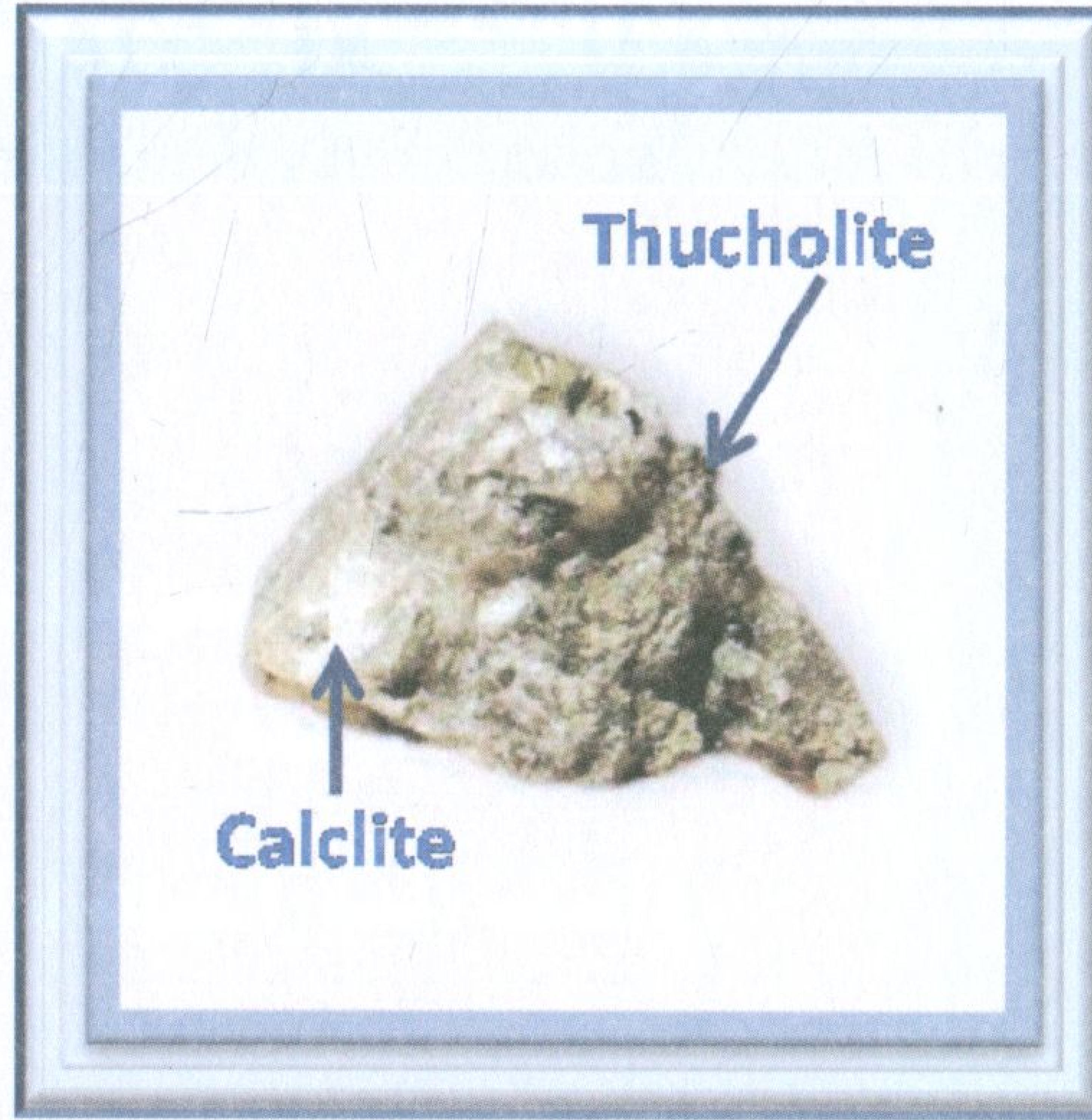
البيجماتيت جرانيت الغنية بالعناصر الأرضية النادرة، ونادراً ما يوجد بالرواسب المنقولة. من المعادن المصاحبة: الكولومبيت، والزركون، والمونازيت، واليورانينيت، والماجنيتيت، والألبيت، والياقوت، والبيريل، والجارنت، والمسكوفيت، والبيوتيت. من أماكن وجوده: منطقة مياس (Miass)، وجبال إيلمين (Ilmen Mountains)، وجبال الأورال الجنوبيّة، روسيا، ومناطق إيفيلاند (Iveland)، ومناطق سيتيسدال (Setesdal) بالنرويج، وفي الولايات المتحدة الأمريكية، منطقة جلاستونبري (Glastonbury)، وكونيتيكت (Connecticut)، وفي بيجماتيت ميشيل (Mitchel)، ولاية فرجينيا، وحول السبرس باين (Spruce Pin)، كارولاينا الشمالية، وبالقرب من نيفو (Nuevo)، كاليفورنيا، وفي نيو ييرس أيفي (New Year's Eve) ، جبال سيريتا (Sierrita)، أريزونا. وفي ديفينا دي أوبا (Divina de Uba)، بالقرب من بيلو هوريزونتي (Belo Horizonte)، ميناس جيريس (Minas Gerais)، البرازيل. وفي مدغشقر، من مناطق أمباتوفوتسيكيلي (Ambatofotsikely)، وأنتسيراب (Antsirab)، وأمبانجابي (Ampangabé)، وفي أماكن أخرى. في منطقة كيفو (Kivu)، إقليم كيفو، الكونغو. في اليابان، مقاطعة إيشيكوا. بالإضافة إلى أماكن أخرى كثيرة معروفة.

١٣- معقدات اليورانيوم العضوية

Urano-organic Complexes

يمثل معدن الثيكوليت (thucholite) معقدات اليورانيوم العضوية. هو معدن أسود إلى بني اللون (شكل ٣-٣٧)، يشبه في الشكل الأنواع الرديئة من الفحم، وهو عبارة عن معقد هيدروكربون غني باليورانيوم. ويوجد المعدن بالصخور الرملية، وتتراوح نسبة اليورانيوم بين نسب شحيحة إلى بعض نسب مئوية. تم

التعرف على المعدن بمقاطعة باري ساوند (Parry Sound) بولاية أونتاريو، كندا.



شكل ٣-٣٧: معدن الثيكوليت على الكالسيت من منجم ألجوم نورديك (Algom Nordic)، أونتاريو، كندا.
(http://www.stockphoto.cc/images)

الباب الرابع

رواسب اليورانيوم

- مقدمة
- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور النارية الجوفية
- رواسب اليورانيوم بالصخور البركانية



١ – مقدمة

توجد رواسب اليورانيوم في الأنواع المختلفة من الصخور، سواء كانت نارية، أو رسوبية، أو متحولة، تتكون عن طريق عمليات جيولوجية في فترات زمنية مختلفة تحت ظروف معينة. رغم أن هناك العديد من الدراسات التي صدرت عن تصنيف رواسب اليورانيوم (على سبيل المثال، Ruzicka, 1971، Dahlkamp, 1980, 1989، Nash *et al.,* 1981، Ziegler, 1984، Bartel *et al.,* 1986)، إلا أن هناك بعض التصنيفات الحديثة التي اعتمدت على نتائج الدراسات المتقدمة لرواسب اليورانيوم. تقوم هذه التصنيفات على عدة أدلة رئيسية لكل نوع من أنواع رواسب اليورانيوم، والتي تتمثل في العلاقة الصخرية، والبنائية، والصحبة المعدنية، ونشأتها، وعمر الخام، والصخر الحاوي له، وما به من عمليات تغاير.

ففي عام ١٩٩٨م، تم تصنيف رواسب اليورانيوم بواسطة وكالة الطاقة النووية (Nuclear Energy Agency "NEA")، التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (Organization for Economic Co-operation and Development "OECD")، إلى ثلاث مجموعات رئيسية بناءً على نوع الصخر (شكل ٤–١):

١– رواسب مصاحبة للصخور النارية الجوفية والبركانية، والتي تضم رواسب اليورانيوم الناتجة عن التمايز الصهيري للمجما الغنية باليورانيوم، ورواسب المعقدات القلوية (alkaline complex deposits)، ورواسب العروق المصاحبة للصخور الجرانيتية، والرواسب الناتجة عن عمليات التحول السائلي (metasomatism)، والرواسب المصاحبة للصخور النارية البركانية، الناتجة عن نشاط المحاليل الحرمائية مرتفعة إلى منخفضة الحرارة، أثناء النشاط البركاني.

رواسب الصخور النارية الجوفية والبركانية
رواسب الصخور النارية الجوفية
رواسب اليورانيوم المجماتية
رواسب المعقد القلوي
رواسب المحاليل الحرمائية
رواسب الجرانيت وما يصاحبه من عروق
رواسب العروق بالقرب من الجرانيت Perigranitic
رواسب التحوال Metasomatite
رواسب الصخور النارية الجوفية والبركانية
رواسب الجرانيت والصخور البركانية الفتاتية بالبيئة اللاتجبلية Anorogenic
رواسب معقد البريشيا
رواسب الصخور النارية البركانية
رواسب بركانية

رواسب الصخور المتحولة
رواسب مزامنة للتحول
رواسب العروق بالصخور المتحولة

رواسب الصخور الرسوبية وأحواض الترسيبي
رواسب قارية
رواسب كونجلميرات حبيبات الكوارتز
رواسب عدم التوافق
رواسب الحجر الرملي
رواسب العروق المصاحبة للرسوبيات
رواسب معقد البيريشيا المنهارة
رواسب الليجينيت
الرواسب السطحية
رواسب بحرية
رواسب الفوسفات
رواسب الطفلة السوداء

شكل ٤-١: تصنيف رواسب اليورانيوم بواسطة وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD/NEA 1998).

٢- رواسب مصاحبة للصخور المتحولة، وتنتج عن فعل المحاليل الناتجة من عمليات التحول، وما تقوم به من استخلاص لليورانيوم من الصخور الرسوبية، والنارية الغنية باليورانيوم، وتضم أيضاً رواسب العروق بالصخور المتحولة.

٣- رواسب مصاحبة للصخور الرسوبية، وأحواض الترسيب الناتجة عن العمليات التكتونية المتأخرة، أو الأحواض المصاحبة للأحداث التكتونية، مثل:

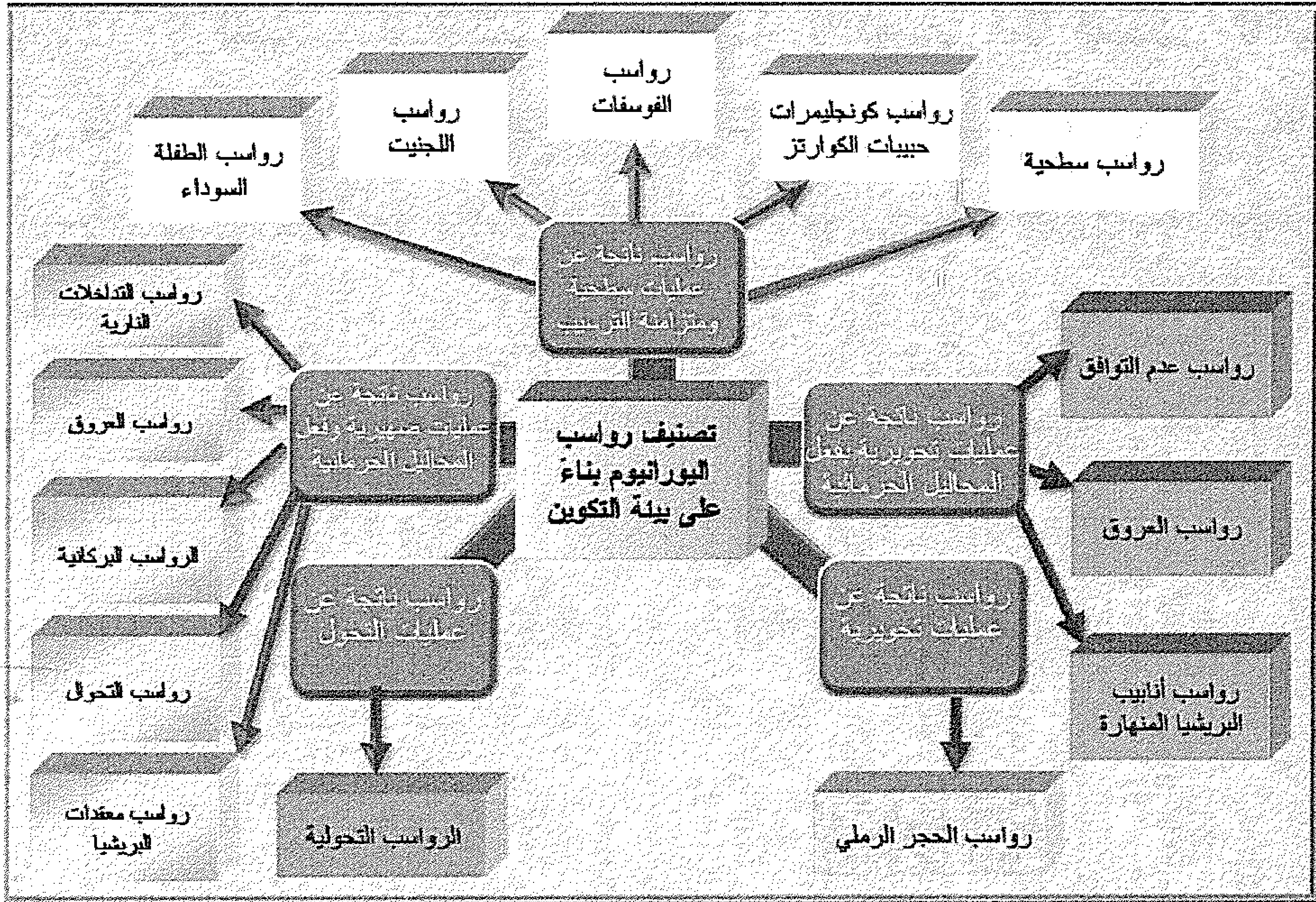
(أ) رواسب مصاحبة للبيئة القارية (continental environment)

- رواسب كنجلميرات حبيبات الكوارتز.
- رواسب عدم التوافق.
- رواسب الحجر الرملي.
- رواسب العروق المصاحبة للرسوبيات.
- رواسب معقد البريشيا المنهارة.
- رواسب اللجنيت.
- الرواسب السطحية المتكونة عن عمليات ترسيب، أو تجوية سطحية.

(ب) رواسب مصاحبة للبيئة البحرية (marin environment)

- رواسب الفوسفات المتكونة بالمحيطات
- رواسب الطفلة السوداء المتكونة بالمجاري المائية القارية.

كما قامت الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA (عام ٢٠٠٠م) بتصنيف رواسب اليورانيوم بناءً على بيئة التكوين إلى خمسة أصناف (شكل ٤-٢):



شكل ٤-٢: تصنيف رواسب اليورانيوم بناءً على بيئة التكوين (الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA ، ٢٠٠٠).

رواسب ناتجة عن عمليات سطحية ومتزامنة الترسيب:

- الرواسب السطحية.
- رواسب كنجلميرات حبيبات الكوارتز.
- رواسب الفوسفات.
- رواسب اللجنيت.
- رواسب الطفلة السوداء.

١- رواسب ناتجة عن عمليات تحويرية (digenetic processes)، مثل رواسب الحجر الرملي.

٢- رواسب ناتجة عن عمليات تحويرية بفعل المحاليل الحرمائية:

- رواسب عدم التوافق.

- رواسب العروق.
- رواسب أنابيب البريشيا المنهارة (collapse breccia- pipes).

٣- رواسب ناتجة عن عمليات صهيرية وفعل المحاليل الحرمائية:

- رواسب التداخلات النارية (intrusive rocks deposits)
- رواسب العروق.
- الرواسب البركانية.
- رواسب التحوال (metasomatites).
- رواسب معقدات البريشيا.
- رواسب ناتجة عن عمليات التحول، مثل رواسب التحول.

وفي عام ٢٠٠٤م، صنفت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) رواسب اليورانيوم إلى خمسة عشر صنفاً، بناءً على قيمتها الاقتصادية:

رواسب عدم التوافق (unconformity-related deposits).

رواسب الحجر الرملي (sandstone deposits).

رواسب كنجلميرات حبيبات الكوارتز.

(Quartz-pebble conglomerate deposits)

رواسب العروق (vein deposits).

رواسب معقد البريشيا (breccia complex deposits).

رواسب التداخلات النارية (intrusive deposits).

رواسب الفوسفوريت (phosphorite deposits).

رواسب أنابيب البريشيا المنهارة (collapse breccia pipe deposits).

رواسب بركانية (volcanic deposits).

رواسب سطحية (surficial deposits).

رواسب تحوالية (metasomatite deposits).

رواسب اللجنيت (lignite).

رواسب الطفلة السوداء (black shale deposits).

١- أنواع أخرى من الرواسب.

سوف نستعرض في هذا الباب رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور النارية، أما باقي أنواع رواسب اليورانيوم المذكورة بعاليه، فسوف نستعرضها في البابين القادمين (الخامس والسادس).

٢- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور النارية الجوفية والبركانية
Uranium Deposits of Igneous Plutonic and Volcanic Association

من المعروف أن الصخور النارية، سواء كانت جوفية أو بركانية، تمثل مصدراً هاماً لكثير من رواسب اليورانيوم. من ضمن الصخور الجوفية المختلفة، نجد أن الصخور الجرانيتية الحامضية، وما يكافئها من صخور بركانية (مثل الريوليت)، تتميز بمحتواها العالي من اليورانيوم، وتمثل مصدراً هاماً له. قد يوجد اليورانيوم في تركيب بعض المعادن الإضافية، مثل الزركون، والألانيت، والمونازيت، ...إلخ. وقد يتركز اليورانيوم أيضاً في الأرضية الزجاجية، أو دقيقة التحبب، والتي تربط بين البلورات المكونة للصخور البركانية. يرجع المحتوى العالي لليورانيوم بتلك الصخور، أحياناً، إلى بعض من العمليات

الثانوية المصاحبة، أو اللاحقة لتكوين تلك الصخور، والتي تشمل تأثير المحاليل الحرمائية، سواء الناتجة عن المراحل المتأخرة من تبلور الصهير، أو الناتجة عن عمليات التحول، أو أيضاً من تأثير عوامل التعرية، والتجوية، والتحاورات التي تتم بعد تكوين الصخور (weathering and diagenesis) .

٢-١- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور النارية الجوفية

تنتج المجما الغنية باليورانيوم من عملية انصهار لا مائي (anhydrous melting) للجزء السفلي من القشرة الأرضية، أو الجزء العلوي من الوشاح، تحت ظروف عالية لنشاط ثاني أكسيد الكربون (P_{CO2}) والفلورين. قد يحدث نوع من الإثراء لليورانيوم مع عملية التبلور التجزيئ (crystal fractionation). قد يحدث أيضاً نوع من إعادة الحركة وإثراء لاحق لليورانيوم بفعل المحاليل الحرمائية، من خلال نظام الكسور والفواصل في النطق النشطة تكتونيًا، مما يؤدي إلى تكوّن رواسب اليورانيوم في هذه الكسور والفواصل (structurally controlled U-deposits). ينعكس ذلك في زيادة وتغير نسبة نظائر السترونشيوم ($^{86}S/^{87}Sr$)، ونظير الأكسجين (^{18}O)، وبعض الظواهر الأخرى مثل الجرزنة (greisenization) (Plant *et al.*, 1999).

تصاحب رواسب التداخلات النارية الصخور الجوفية الفلسية، أو الصخور تحت القلوية، مثل السيانيت، والكربوناتيت، والجرانيت، والمونزونيت (monzonite)، والبيجماتيت. تكون درجة الخام عادةً منخفضة، حيث تصل إلى ٠,٠٥٪ أكسيد يورانيوم (U_3O_8)، ولكن من حيث الكم، قد تصل إلى مئات الآلاف من الأطنان. من أشهر الأمثلة لهذه الرواسب هي رواسب روزينج بناميبيا (Rossing, Namibia)، حيث تحتوي على احتياطي مبدئي يصل إلى ٣٧١,٤ مليون طن لخام ذو درجة تصل إلى ٠,٠٣٥٪ أكسيد اليورانيوم، لكل

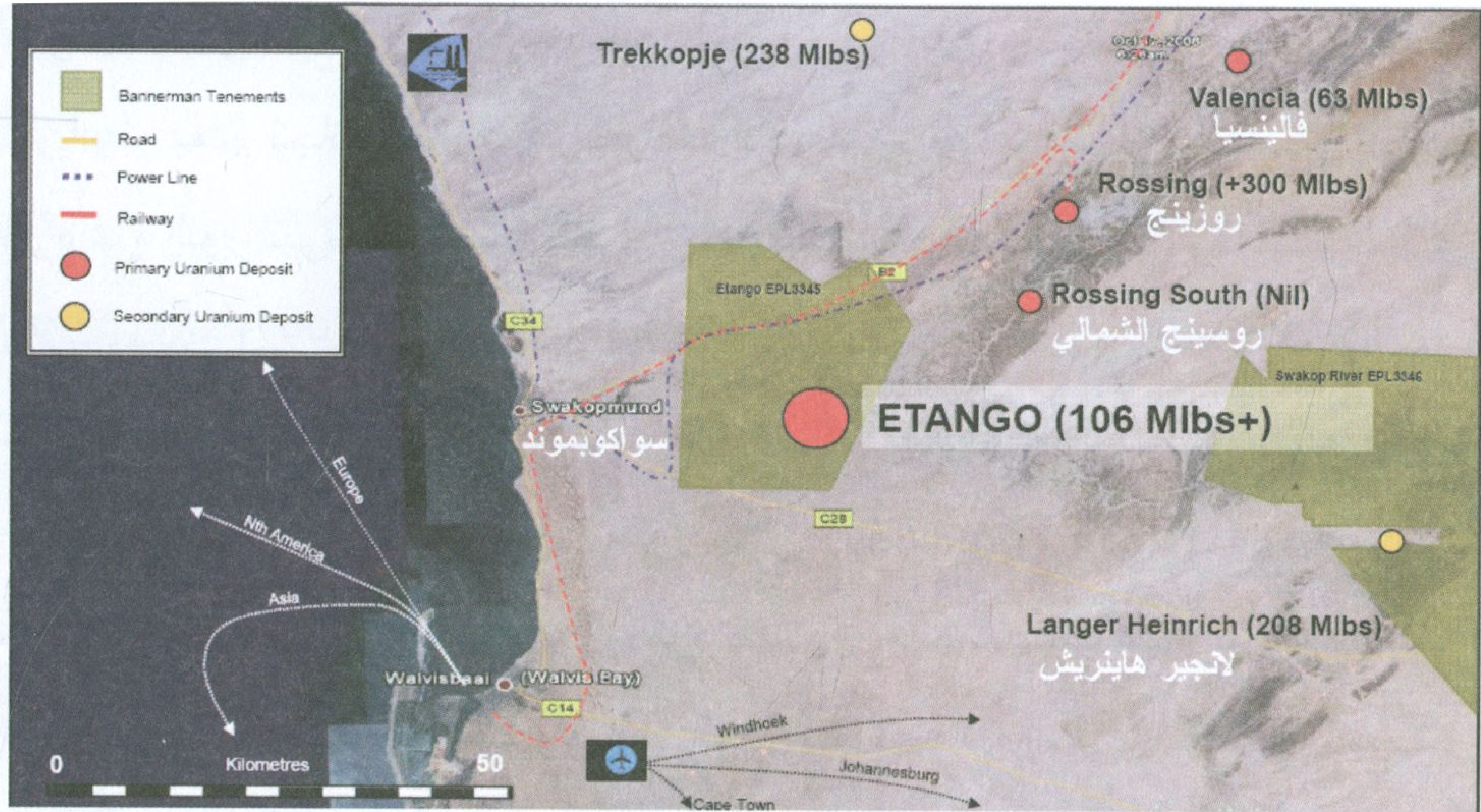
١٣٠٠٠ طن من الخام (Mckay and Meizitis, 2001). ومن الأمثلة الأخرى، الرواسب المصاحبة لجرانيتات الليموزين (Limousin)، بمنطقة الماسيف سنترال (Massif Central) بفرنسا، ورواسب اليورانيوم بصخور النيفيلينيت (nephelinite).

تعتبر رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور الجرانيتية من أكثر الأنواع المعروفة، في كل من جمهورية مصر العربية والمملكة العربية السعودية. ففي مصر، توجد رواسب اليورانيوم الجرانيتية بعدة مواقع، وهي منطقة جتار جنوب غرب الغردقة، والمسكات والعرضية عند الكيلو ٨٥ بطريق قنا-سفاجا، وأم أرا جنوب شرق أسوان، وكاب عميرا وسيلة جنوب الصحراء الشرقية. وفي السعودية، توجد رواسب اليورانيوم الجرانيتية بجبل صايد، وأم البرك، وجبل الشعر، والغُريّة. سوف نستعرض فيما يلي بعض الأمثلة لتمعدنات اليورانيوم بالصخور الجوفية، لمعرفة طبيعة هذه التمعدنات، وظروف تكّونها.

٢-١-١- رواسب روزينج بناميبيا Rössing, Namibia

يعد منجم روزينج أحد أمثلة مناجم نظام الحفرة المفتوحة (open pit)، والذي يقع بصحراء ناميب (Namib) بناميبيا، جنوب غرب أفريقيا. يبعد المنجم حوالي ٦٠ كم شمال شرق مدينة سواكوبموند (Swakopmund) (شكل ٤-٣). يعتبر منجم روزينج المنجم الوحيد الاقتصادي الذي يستغل في الوقت الحالي لليورانيوم المصاحب للصخور الجرانيتية.

تقع منطقة روزينج بالنطاق المركزي (central zone)، والذي يمثل جزءًا من حزام دامارا التجبلي (Damara Orogenic Belt). يمثل حزام دامارا التجبلي جزءًا من حزام الحمى الأفريقي (Pan African) والذي يقطع القارة، ويحدد دروز الالتحام (sutures) لتصادمات قارية أدت إلى تكوّن القارة الجنوبية، والتي



شكل ٤-٣: خريطة تبين موقع منجم روزينج والمناجم المصاحبة بناميبيا.

تسمى جوندوانالاند (Gondwanaland) في زمن ما قبل الكمبري المتأخر (Late Precambrian)، إلى زمن الحياة القديمة المبكر (Early Palaeozoic).

تعرضت المنطقة المركزية لحزام داماراا التجبلي إلى التحول بسحنة الأمفيبوليت الأعلى إلى الجرانيوليت، ويحتوي على العديد من التواجدات النارية المتداخلة في صخور رسوبية متحولة، وعلى صخور الرخام، والنايس (gneisses). تم تحديد عمر صخور النايس باستخدام نظائر اليورانيوم والرصاص (U/Pb) في الزركون، والتي قدرت بـ ١٠٣٨ ± ٥٨ مليون سنة (Kröner *et al.*, 1991). كما تم تحديد عمر الصخور الجرانيتية بالمنطقة المركزية لحزام داماراا التجبلي باستخدام نظائر اليورانيوم والرصاص (U/Pb) في الزركون، والمونازيت، والتي عكست عمرين لهذه الصخور: العمر الأقدم ويقدر بـ ٥٢٦ إلى ٥٦٣ مليون سنة، لجرانيتات فقيرة في اليورانيوم، وعمر أحدث يقدر بـ ٥٠٥ إلى ٥١٧ مليون سنة، لجرانيتات غنية باليورانيوم (Basson and Greenway, 2004). يُظهر الجرانيت الحاوي على رواسب

اليورانيوم "من نوع ألاسكايت" نسيجًا أبليتيًا وجرانيتيًا وبيجماتيتيًا. يتميز هذا الجرانيت بعدم تجانس توزيع تركيزات اليورانيوم به، حيث أن هناك أجزاء منه فقيرة في اليورانيوم، أو ذات تمعدن ضعيف، وأخرى غنية باليورانيوم الاقتصادي (Roesener and Schreuder, 1992). ساعدت عمليات الحفرة المفتوحة (شكل ٤-٤) على انكشاف تداخل الألاسكايت الغني باليورانيوم، والصخور المحيطة والمتمثلة في مكون خان (Khan Formation)، وما يعلوه من مكون روزينج. يتكون مكون خان من صخور ميجماتيت كوارتزوفلسباثية، ونايس غني بالأمفيبول والبيروكسين المائل، بالإضافة إلى وحدة إتوسيس (Etusis) غير المتجانسة، رأسياً، وجانبياً والتي تتكون من صخور الرخام والنايس الكالكسيليكاتي، والشيست، والنايس البيليتي، والكوارتزيت، والكونجلميرات.

تتمثل معادن اليورانيوم الأولية بمنجم روزينج، في اليورانينيت صهيري النشأه، والذي يوجد بين معادن الكوارتز، والفلسبار، أو مع صحبة من البيوتيت والزركون (Berning *et al.,* 1967، Cuney, 1980، وBerning, 1986). كما يوجد بنسبة أقل، معدن البيتافيت الغني بالتيتانيوم والنيوبيوم، كمكتنفات في الكوارتز والفلسبار (Berning, 1986). بالإضافة إلى معادن اليورانيوم الثانوية، مثل اليورانوفان، والبيتا-يورانوفان، والجاميت، والتوربيرنيت، والميتا-توربيرنيت، والكارنوتيت، والميتا-هاوياييت، والثوروجاميت (Berning *et al.,* 1976، Berning, 1986، Cuney, 1979، وMarlow, 1981). نتجت هذه المعادن الثانوية عن عمليات تجوية بفعل المحاليل الحرمائية أو السطحية. اقترح نيكس وآخرون (Nex *et al.,* 2002) أن الوضع الجيولوجي للكتل الجرانيتية ذات الاتجاه شبه الرأسي، ساعد إلى درجة كبيرة في تسهيل حركية كميات كبيرة من تلك المحاليل.



شكل ٤-٤: نظام الحفرة المفتوحة Open pit بمنجم روزينج، ناميبيا.
(http://www.infomine.com/minesite/minesite.asp?site=rossing)

رغم أن خام روزينج يعد من الدرجة المنخفضة، إلا أنه يمثل ٨٪ من الإنتاج العالمي لليورانيوم عام ٢٠٠٢م (Nield, 2002). تم تصنيف رواسب يورانيوم روزينج على أنها رواسب مصاحبة للجرانيت (granite-hosted)، أو مصاحبة للألاسكايت (alaskite-hosted) (Berning, 1986، Basson and Greenway, 2004). يصل معدل الخام إلى واحد كيلوجرام لكل طن من أكسيد اليورانيوم (U_3O_8)، أو ما يعادل ٨٤٠ جزء في المليون من اليورانيوم، بمتوسط ٠,٣٥ كجم/طن أكسيد اليورانيوم، أو ٣٠٠ جزء في المليون من اليورانيوم (Nield, 2002).

تصاحب تمعدنات اليورانيوم البنيات القبابية بمنطقة روزينج (Basson and Greenway, 2004). نشأت هذه التمعدنات على مراحل متعدده، كان أولها معدن اليورانينيت الأولي المصاحب للجرانيتات متأخرة النشأه بمنطقة روزينج. عملت

المحاليل الحرمائية، من خلال التراكيب الجيولوجية، على إعادة توزيع اليورانيوم وتركيزه في أصناف أخرى، مثل اليورانوفان والمعادن الثانوية الأخرى (Basson and Greenway, 2004). رغم أن رواسب اليورانيوم المعروفة بمنطقة روزينج تتركز في الجزء الأوسط الغربي لحزام دامارا (Damara) (مثل منجم روزينج، ولانجر هاينريش (Langer Heinrich)، وفالينسيا (Valencia)، انظر شكل ٤-٣)، فقد تم التعرف على اليورانيوم في الشمال (إنجو فاللي Engo Valley)، وأيضاً في الجنوب (حزام ناماكوا Namaqua Belt).

يقع راسب لانجير هاينريش (Langer Heinrich) في منطقة وادي النهر (River valley)، ٩٠ كم شرق سواكوبموند (Swakopmund) (انظر شكل ٤-٣)، والذي يمثل جزءًا من جرانيت بلويدكوبي (Bloedkoppie)، وشيست دامارا في الشرق. تصل درجة الخام إلى ١٠٠جم/طن أكسيد اليورانيوم U_3O_8. توجد تمعدنات اليورانيوم في الصخور الرسوبية على شكل أجسام عمدانية، حيث ينتشر معدن الكارنوتيت كبقع صغيرة، أو عدسات حول الحبيبات، أو في الشقوق، أو على صورة منبثات بالصخر الأصلي.

توجد رواسب فالينسيا بالصخور الرسوبية المتحولة لتتابع دامارا. تتداخل صخور الألاسكايت الغنية باليورانيوم في الجناح الشمالي الشرقي لطية مضطجعة (recumbent synclinorium)، يشغل لبها صخور متحولة، حيث توجد هذه الصخور على شكل قواطع مختلفة السماكة وعروق تمثل أطوارًا متزامنة ولاحقة للتداخل الناري. يحتوي الألاسكيت على العديد من المكتنفات من الصخور الأقدم، ويتغير في الشكل من أبليتي (aplitic) إلى بيجماتيتي، حيث يتركز وجود اليورانيوم في الأجزاء دقيقة التحبب منه. توجد تمعدنات اليورانيوم الثانوية، مثل معدن اليورانوفان، في الأمتار القليلة العليا من أجسام الألاسكيت.

توجد هذه المعادن على شكل قشور صفراء تغطي مستويات التقشر والفواصل. يوجد اليورانينيت في صورته الأصلية مع وجود بعض التغايرات على حوافه. ينتشر اليورانيوم بالألاسكايت بشكل غير منتظم، ولكن يوجد خام اليورانيوم عالي الدرجة في درز التحام مع الصخور الرسوبية المتحولة الخالية، أو الضعيفة، في اليورانيوم. أثبتت الدراسة التي تمت عام ١٩٨٩م أن إجمالي الخام يصل إلى ٤٢,٧ مليون طن، بمتوسط درجة ٠,٢١٤ كجم/طن U_3O_8 حتى عمق ٢١٠ مترًا، ويجرى حالياً إعادة تقييم لهذا الخام.

تعتبر رواسب اليورانيوم بمنطقة إنجو فالي (Engo Valley) من نوع عدم التوافق التخالفي (disconformity-type)، حيث توجد تمعدنات اليورانيوم (الكارنوتيت) في رواسب المراوح الركامية (alluvial fan) لمكون كارو–إج دويكا (Karoo-age Dwyka)، وأيضاً في صخور الطفلة لمجموعة إيكا (Ecca Group) (يورانينيت دقيق التحبب مصاحبًا معادن البيريت والكالكوبيريت). يعتقد أن مصدر اليورانيوم بهذه الرواسب يرجع إلى التداخلات الجرانيتية اللاحقة للحدث التكتوني لدامارا. تصل كمية الخام من منطقتين للتمعدنات إلى ٥,٦٨ مليون طن، بمعدل ٣٥٠ جم/طن، ولكن تتفاوت درجة الخام من نطاق إلى آخر بدرجة كبيرة في مسافات قصيرة (Fletcher, 1981).

٢-١-٢- رواسب اليورانيوم بالصخور الجرانيتية بالمملكة العربية السعودية

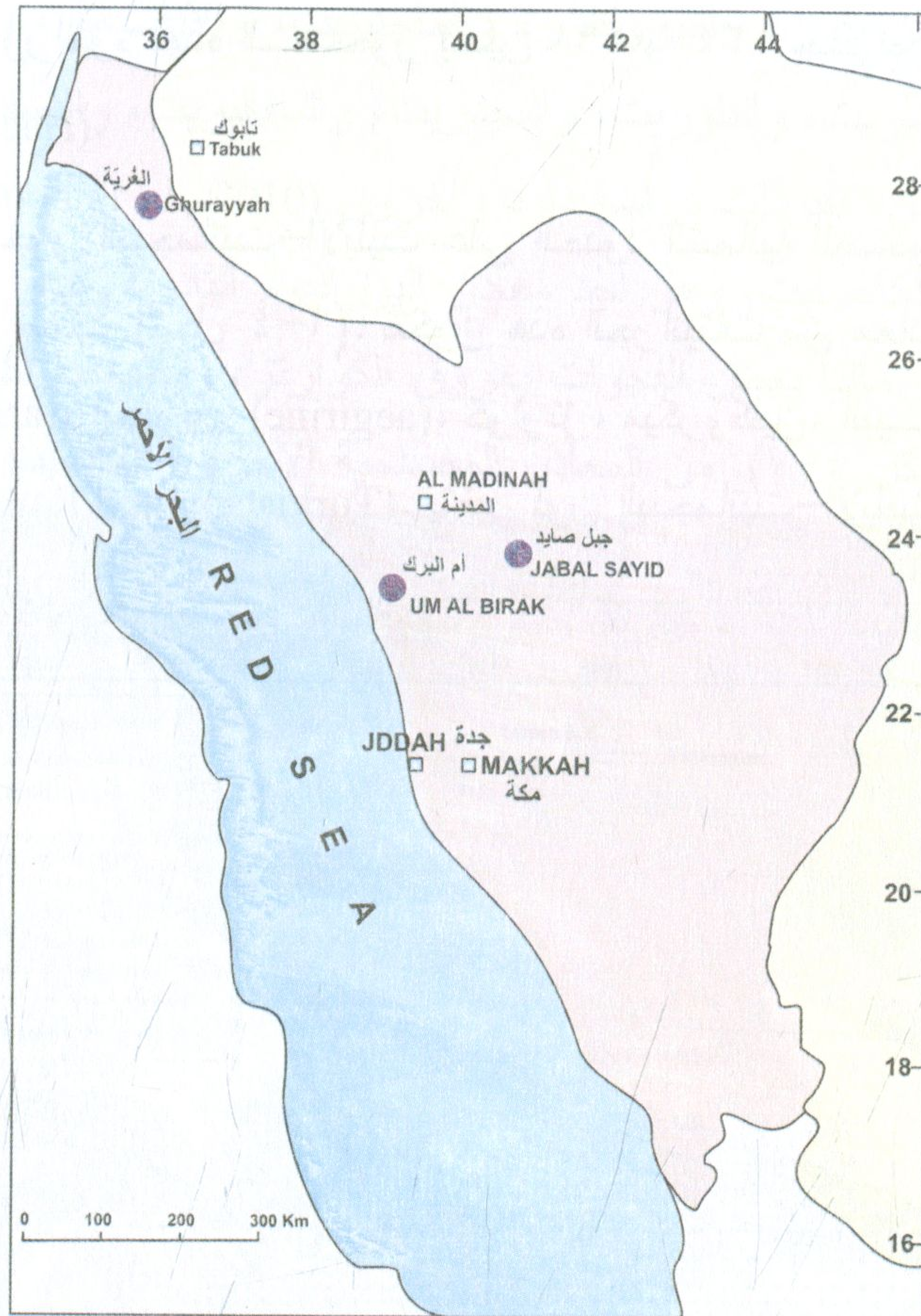
توجد تمعدنات اليورانيوم بالمملكة العربية السعودية، بالصخور الجرانيتية الحديثة، والبيجماتيت، والتي سبق وأن تعرضت لعمليات تحوال سائلي (metasomatism). كشفت الدراسات السابقة عن وجود خمس مناطق لتمعدنات اليورانيوم، والعناصر المصاحبة له، مثل الثوريوم، النيوبيوم، التنتالوم، القصدير، اليتريوم، الزركونيوم والعناصر الأرضية النادرة (REE). هذه

المناطق هي: منطقة جبل صايد، والتي تحتوي على يورانيوم بمتوسط ١٣٠ جزء في المليون (Drysdall and Douch, 1986)، ومنطقة الغُريّة (Ghurrayh)، والتي تحتوي على متوسط تنتالوم يصل إلى ٢٠٠ جزء في المليون، ومنطقة جبل طاولة (Jabal Tawlah) ، ومنطقة أم البرك (Umm al Birak)، وجبل حمرا (Jabal Hamra). تقع منطقة الغُريّة وجبل طاولة بأقليم مدين (شكل ٤-٥). توجد التمعدنات بالصخور الجرانيتية القلوية على هيئة معادن إضافية دقيقة التحبب (الغُريّة ، وجبل طاولة، وأم البرك)، أو في صخور البيجماتيت الأبليتي (aplite pegmatite)، والتي توجد على قمة، أو أطراف الصخور الجرانيتية القلوية، مثل منطقة جبل صايد. تتمثل التمعدنات في الكولمبيت، وتنتاليت، وبيروكلور، ومونازيت، وباستناسيت (bastnaesite)، وسينشيسيت (synchesite)، ودوفيريت (doverite)، وجاجارينيت (gagarinite)، وزينوتيم (zenotime)، وفيرجوسنيت (fergusonit)، والزركون. تحتوي نطق التمعدنات على تركيزات عالية من التنتالوم، والقصدير، واليورانيوم، والثوريوم، والزنك، والفلورين. يمكن إنتاج تلك العناصر المصاحبة كمنتج جانبي (by-product)، عند استخلاص عناصر النيوبيوم، والزركونيوم، والعناصر الأرضية النادرة.

منطقة الغُريّة Ghurayyah

تقع الغُريّة بالجزء الشمالي الغربي للمملكة العربية السعودية، بالقرب من مدينة تبوك، وتبعد عن شاطئ البحر الأحمر بحوالي ٥٠ كم (شكل ٤-٥). توجد التمعدنات بصخور الجرانيت القلوي، والذي يوجد على شكل مكشف دائري باتساع يصل إلى واحد كيلومتر. ترجع الجرانيتات إلى عمر البروتيروزوي الحديث (Neoproterozoic). تضم الجرانيتات العديد من عروق البيجماتيت، والتي تحتوى على معادن غنية بالعناصر الأرضية النادرة، وعلى رواسب ذات

قيمة للتنتالوم، والنيوبيوم، والزركونيوم، والثوريوم. قدرت كمية الرواسب بحوالي ٥٨٠ مليون طن. يحتوي الخام على ٠,٠٠٤٪ يورانيوم، ٠,١٨٪ ثوريوم ، ١,٨٥٪ زركونيوم ، ٠,١٧٪ نيوبيوم، ٠,١٢٪ يتريوم (Almohandis, 1993). قد تصل احتياطيات اليورانيوم بمنطقة الغُريّة إلى حوالي ٤٤٠٠٠ طن (Qadhi, 1990).

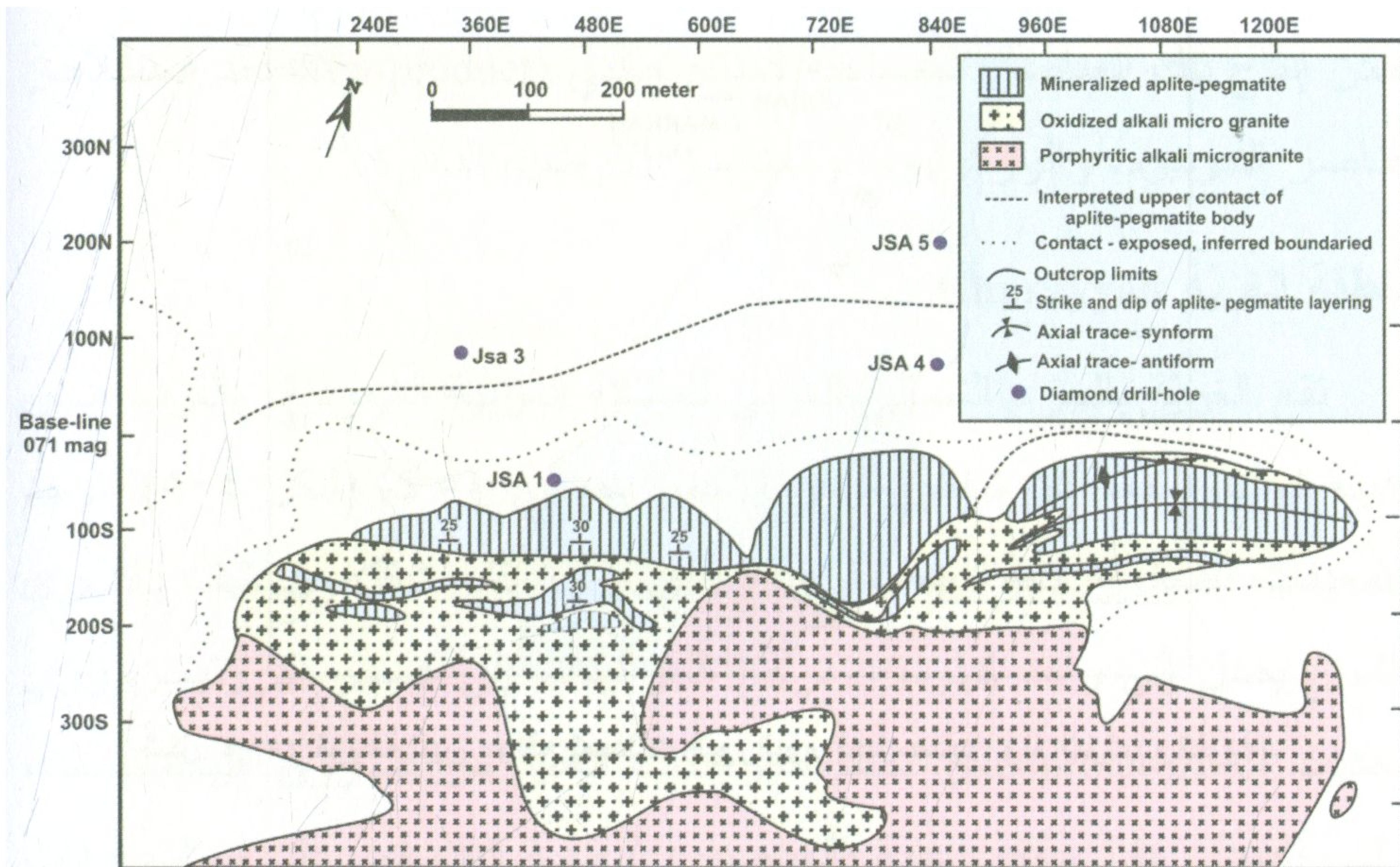


شكل ٤–٥: خريطة تبين مواقع تمعدنات اليورانيوم (جبل صايد، وأم البرك، والغُريّة).

جبل صايد Jabal Sayid

توجد تمعدنات اليورانيوم بمنطقة جبل صايد بصخور البيجماتيت–الأبليت، والتي تم اكتشافها عن طريق المسح الإشعاعي (Ahmed, 1957)، تبع ذلك حفر عدة آبار اختبارية للتعرف على تمعدنات اليورانيوم (شكل ٤-٦) (Schaffner, 1957). يصاحب تمعدنات اليورانيوم تركيزات عالية لعناصر النيوبيوم والعناصر الأرضية النادرة (Turkistany and Ramsay, 1982). تتراوح تركيزات اليورانيوم بهذه الصخور بين ٤٩ و ١٣٤ جزء في المليون (Hackett, 1986).

تقع صخور البيجماتيت–الأبليت على الحدود الشمالية للصخور الجرانيتية القلوية لجبل صايد (شكل ٤-٦). تتكون هذه الجرانيتات من معادن أرفيدسونيت (arfvedsonite)، إيجيرين (aegirine)، كوارتز، ميكروكلين، ألبيت وهيماتيت (Turkistany and Ramsay, 1982). يتغير لون البيجماتيت–الأبليت من اللحمي أو الوردي إلى البني، اعتماداً على نسبة أكاسيد الحديد. توجد صخور



شكل ٤-٦: خريطة جيولوجية لمنطقة جبل صايد (محورة عن Ahmed, 1957).

البيجماتيت – الأبليت على شكل طبقات متغيرة التركيب (Hackett, 1984). تصل سمك الطبقة إلى حوالي ٠,٣ – ٥ مترًا، وتتكون من بيجماتيت خشن التحبب، وبيجماتيت دقيق التحبب، وأبليت. أظهرت دراسة هاكيت أن هذه الطبقات تظهر تركيبًا متجانسًا وحدودًا واضحة. كما دلت الدراسة على وجود العديد من المعادن الإضافية بصخور البيجماتيت–الأبليت بجبل صايد، مثل : الباستناسيت (bastanaesite)، والسينشيسيت (synchysite)، والمونازيت، والثوريت، والزركون، والبيروكلور، والماجنيتيت، والأناتاس، والبروكيت، والروتيل، والبيريت، والفلوريت، والسيدريت، والسفاليريت، والاسفين. بالإضافة إلي هذه المعادن، فقد دلت دراسة داود وآخرون (Dawood *et al.*, 2010) على وجود معدن الكاسوليت، وهو أحد معادن اليورانيوم الثانوية. يبدو هذا المعدن باللون الأصفر مالئاً بعض الفجوات بعروق الكوارتز، ومصاحباً أكاسيد الحديد والملاكيت (شكل ٤–٧). من المعادن المصاحبة الأخرى، الكالسيت والجالينا.



شكل ٤–٧: صورة فوتوغرافية تبين وجود معدن الكاسوليت بعروق الكوارتز بصخور البيجماتيت–أبليت بجبل صايد، يظهر فى الصورة أيضًا الملاكيت ومعادن أكاسيد الحديد.

منطقة جبل طاولة Jabal Tawlah

توجد التمعدنات المشعة بمنطقة جبل طاولة بصخور الجرانيت والسيانيت دقيق التحبب (microgranite-microsyenite). أوضحت دراسة درايزدال وداوش (Drysdall and Douch, 1986) أن هذه الصخور قد عانت من عمليات تحوال سائلي، مثل عمليات الألبتة (albitization)، والتي لعبت دوراً هاماً في تركيز بعض المعادن الغنية بالنيوبيوم، والتنتالوم، والقصدير، والثوريوم، والإيتريوم، والزركونيوم، والعناصر الأرضية الثقيلة (heavy REE). من المعادن الممثلة للتمعدنات بجبل طاولة: جاجارينيت، وفيرجوسونيت، وزينوتيم، وفلوريت، وزركون، وكولومبيت، وثوريت، وسفاليريت، وجالينا، وبيريت، وإلمينيت، وهيماتيت، وليمونيت، وماجنيتيت، وجوتيت (goethite)، وسيدريت، ومعادن أخرى حاوية على المنجنيز.

بالإضافة إلى الأمثلة التي تم ذكرها سابقاً عن تواجدات اليورانيوم، والتي ارتبطت في معظمها بصخور الجرانيت القلوية والبيجماتيت، فإن هناك بعض التركيزات العالية لليورانيوم، والتي تم تسجيلها بصخور الغطاء الرسوبي، مثل الحجر الرملي (Wajid Sandstone) (من عمر الكمبري-أوردوفيشي) (Matzko and Naqvi, 1976). تصل تركيزات اليورانيوم بهذه الصخور إلى ٧٠ جزء في المليون، وتكمن غالباً في المادة اللاحمة للحجر الرملي والمكونة من الحديد. لم تصل هذه التركيزات إلى درجة الرواسب ذات القيمة الاقتصادية كخام لليورانيوم. ومن الرواسب الأخرى والتي تعتبر مصدراً لليورانيوم، صخور الفوسفات بمنطقة طريف (Turayf) بالجزء الشمالي الغربي للمملكة العربية السعودية، على امتداد الحدود مع الأردن. تحتوي هذه الرواسب على ٠,٠٠٧-٠,٠١٨٪ من أكسيد اليورانيوم (U_3O_8) (Afia and Mansour, 1977، و Fath and Khan, 1982).

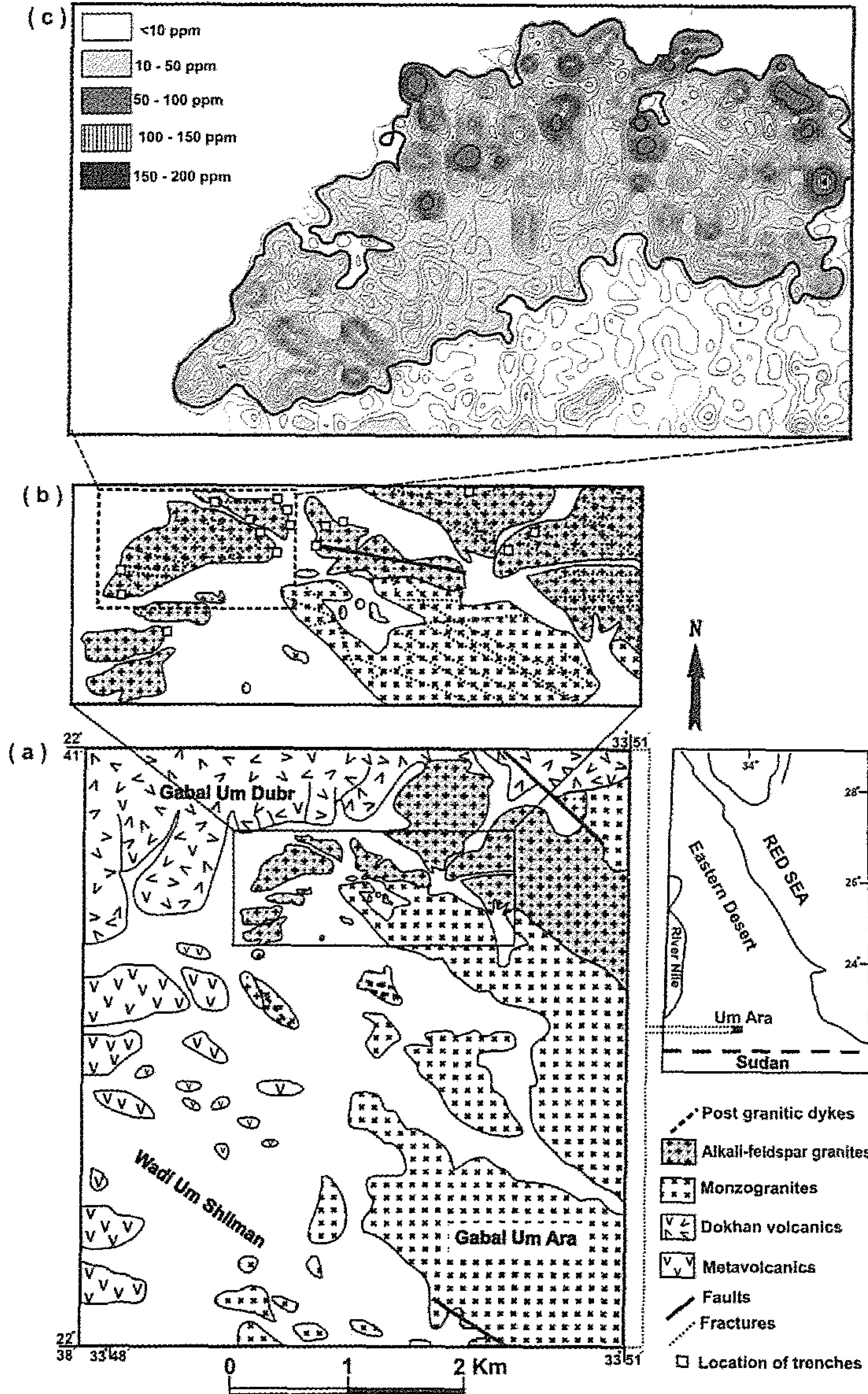
٢-١-٣- رواسب اليورانيوم بالصخور الجرانيتية بجمهورية مصر العربية

تم تسجيل العديد من مناطق وجود اليورانيوم المصاحبة للصخور الجرانيتية والتي تقع معظمها في الصحراء الشرقية: مثل منطقة أم آرا، المسكات، العرضية، جتار، وجبل السيلة، ومناطق أخرى.

منطقة أم آرا Um Ara

تقع منطقة أم آرا جنوب الصحراء الشرقية المصرية (شكل ٤-٨). تم دراسة جيولوجية المنطقة بواسطة العديد من الباحثين، منهم: عبد المجيد (Abdel Meguid, 1986)، وإبراهيم (Ibrahim, 1986) ، وعبد الله (Abdalla, 1996). تضم المنطقة صخورًا بركانية متحولة، وصخورًا بركانية أحدث منها، تعرف باسم "بركانيات الدخان Dokhan volcanics". يتداخل في هذه الصخور، صخور جرانيتات أم آرا، والتي صنفت على أنها منزوجرانيت، وجرانيت فلسباري قلوي. يتكون المنزوجرانيت من ميكروكلين بيرثيت، وبلاجيوكليز، وكوارتز، وبيوتيت، بالإضافة إلى كميات بسيطة من المسكوفيت. كما يوجد كل من الماجنيتيت والاسفين كمعادن إضافية. بينما يتكون الجرانيت الفلسباري القلوي من ميكروكلين، وميكروبيرثيت، وألبيت، وكوارتز، وقليل من الميكا، والبيوتيت، والجارنت. تضم المعادن الإضافية كل من الكولومبيت، والألمينيت، والزركون، والزينوتيم، والثوريت، والمونازيت، بالإضافة إلى معدن اليورانوفان. يصاحب هذه المعادن معدن الفلوريت بنفسجي اللون. كما يكثر بهذه الصخور عروق البيجماتيت، والكوارتز. توجد معادن اليورانيوم الثانوية، يورانوفان بشكل أساسي، كقشور، أو بقع على أسطح الكسور والفواصل، أو على شكل بلورات مالئة للفراغات، أو منبثة كمعدن إضافي بالصخر. تعرضت صخور جرانيت الفلسبار القلوي لعمليات تحوال سائلي (metasomatism)، شمل على كل من عمليات الألبتة (albitization)، وعمليات تحوال فلسباثي بوتاسي (K-feldspathization). يصاحب الأخير إغناءً لعناصر البوتاسيوم، والرصاص، وزيادة تركيز عناصر النيوبيوم، والليثيوم، والفلورين، ونقص في الصوديوم.

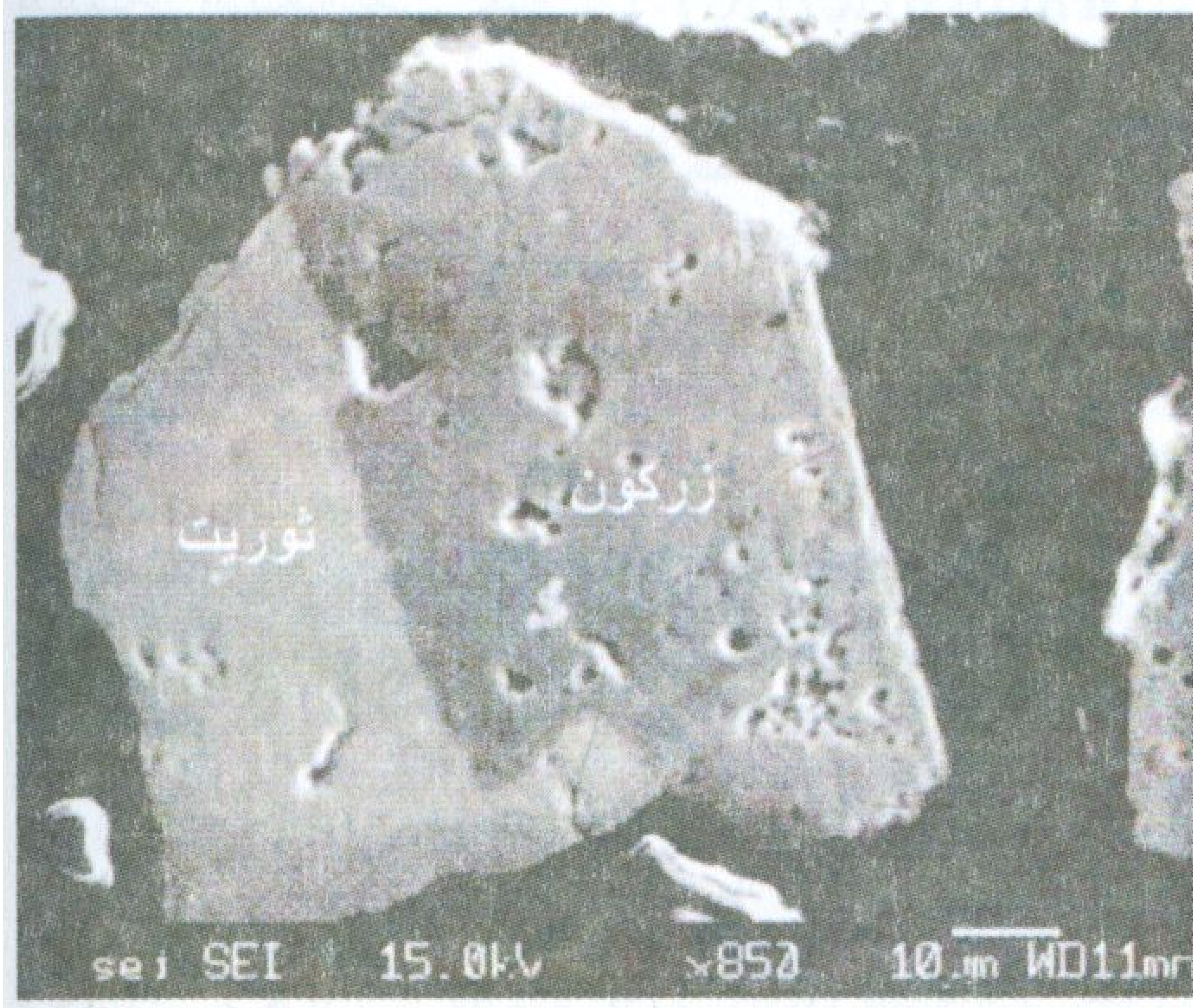
بينما يصاحب عمليات الألبتة إحلالاً للصوديوم محـــل البوتاســـيوم والكالـــسيوم بمعادن الفلسبار (Abdalla, 1996).



شكل ٤-٨: (أ، ب) خريطة جيولوجية لمنطقة أم آرا (Abdalla *et al.*, 1996). (ج) خريطة راديومترية تبين توزيع اليورانيوم بنطاق التمعدنات (Mansour *et al.*, 2000).

اعتمدت المرحلة الأولى لاكتشاف اليورانيوم بمنطقة أم آرا على عمليات مسح إشعاعي جوي (aeroradiometric) بواسطة صادق (Sadek, 1978). تبع ذلك عمليات مسح إشعاعي أرضي، من كل من عبد المجيد (Abdel Maguid, 1986)، وإبراهيم (Ibrahim, 1986). بعد ذلك، تم وضع برنامج استكشافي بواسطة هيئة المواد النووية المصرية، لتحديد كميات الخام وجودته. هدف هذا البرنامج إلى تتبع أماكن التمعدن لمسافة حوالي ٣,٥ كيلومترًا عن طريق حفر ١٦ خندقًا (trench) لعمق حوالي ٥ أمتار، بمناطق الشاذات الإشعاعية. ولوحظ تكون معادن اليورانيوم الثانوية، على أسطح الفواصل، مصاحباً لأكاسيد الحديد، والمنجنيز، ومعادن الفلوريت، والكالسيت. تتمثل معادن اليورانيوم الثانوية في اليورانوفان والبيتا-يورانوفان (Abdel Meguid, 1986، Ibrahim, 1986، وAbdalla, *et al.*, 1996). كما أجريت بعض التجارب المعملية على عينات من أم آرا تزن حوالي ٣٠ كيلوجرامًا بواسطة إبراهيم (Ibrahim, 1994) ، وسيد (Said, 1996) ، وعوض الله (Awdalla, 1999). أثبتت هذه الدراسات أن حوالي ١٠-٣٠٪ من محتوى اليورانيوم بالصخور الجرانيتية لمنطقة أم آرا، يسكن في المعادن الإضافية. كما تم إجراء مسح إشعاعي طيفي أرضي لجرانيتات أم آرا عام ٢٠٠٠م بواسطة منصور وآخرون باستخدام جهاز المسح الطيفي (Spectrometer, GS-256). حددت الدراسة نقاط الشاذات الإشعاعية، ودلت على أن معدلات تركيز اليورانيوم المكافيء (equivalent U) تصل إلى ٢٠٠ جزء في المليون. تتغير قيم نسبة اليورانيوم المكافئ إلى الثوريوم المكافئ (eU/eTh) بشكل مباشر، مع قيم اليورانيوم المكافئ (eU)، بينما تتغير هذه النسبة عشوائيًا مع الثوريوم المكافئ (eTh)، يدل ذلك على أن تركيز العناصر المشعة بالمنطقة تأثرت بعمليات تحوال لاحقة لتموضع الصخور الجرانيتية (post-magmatic). تُظهر صخور المونزوجرانيت أقل قيم لليورانيوم والثوريوم، بينما تعكس

صخور جرانيت الفلسبار القلوي أعلى قيم ثوريوم/يورانيوم، بنسبة تصل إلي ٣ (Th/U = 3). يدل تركيز الشاذات الإشعاعية بمناطق التغاير الألبيتي والبوتاسي، على دور عمليات التحول السائلي اللاحق في إعادة توزيع عناصر اليورانيوم بهذه الصخور. كما دلت الدراسة الحديثة التي أجراها عبدالنبي (Abd El-Naby, 2009b) على وجود معادن إضافية أخرى مثل الثوريت الغني باليورانيوم (اليورانوثوريت)، والثوريت، بالإضافة إلى الزركون (شكل ٤-٩).

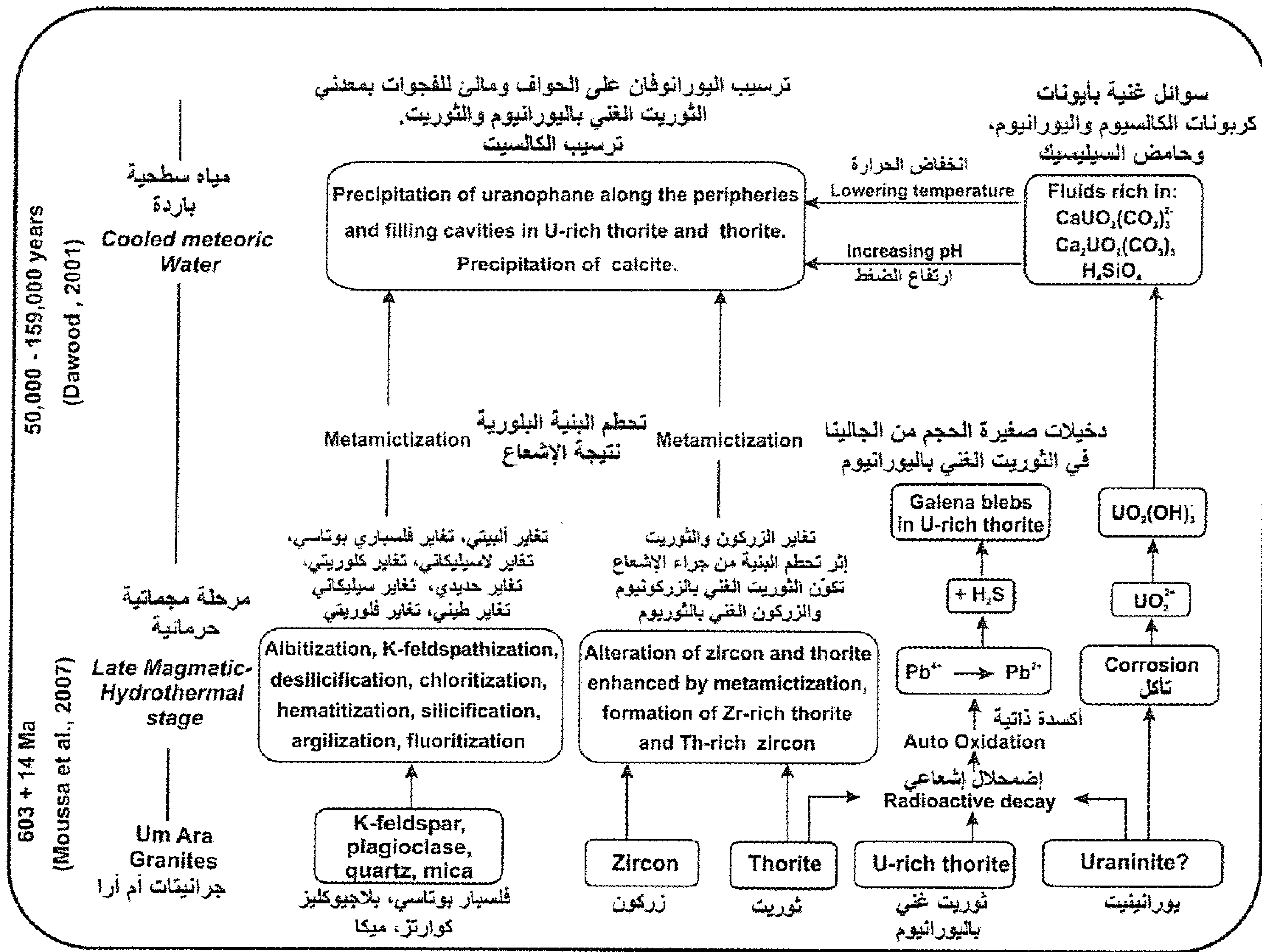


شكل ٤-٩: صورة بالمسبار الإلكتروني لتوأم من الزركون والثوريت بالصخور الجرانيتية لأم آرا (عبد النبي ٢٠٠٩ب).

تم وضع نموذج لنشأة معادن اليورانيوم بمنطقة أم آرا (شكل ٤-١٠)، يتلخص هذا النموذج في مرحلتين أساسيتين، تتمثل المرحلة الأولى في عمليات تغاير سائلي، مثل الألبتة والفلسبثة. وتتمثل المرحلة الثانية في عمليات تحريك لليورانيوم من المعادن الحاوية عليه بفعل المياه السطحية بالقرب من السطح. غالباً، تحرك اليورانيوم في صورة معقدات كربونات اليورانيل، أو فلوريد اليورانيل. يؤكد ذلك، وجود كل من الكالسيت والفلوريت بصحبة معدن اليورانوفان. تحت ظروف معينة من الحرارة ودرجة الحامضية (pH)، أصبحت تلك المعقدات غير مستقرة (مع وجود وفرة من الكالسيوم بالمحاليل)، مما أدى إلى ترسب كل من اليورانوفان، والكالسيت، والفلوريت.

رغم أن الدراسات المبكرة (Abdel Meguid, 1986، و Ibrahim, 1986) دلت على وجود اليورانينيت كمعدن أولي، إلا أن الدراسات الحديثة (Abdalla,

1996، Dawood and Abd El-Naby, 2001، وAbd El-Naby, 2009b) لم تسجل وجود اليورانينيت، وأرجعت مصدر اليورانيوم في المحاليل إلي عمليات تغـــاير للمعادن الإضافية، مثل اليورانوثوريت والزركون، بالإضافة إلـــى اليورانيـــوم، الموجود بين حبيبات الصخر (labile uranium).

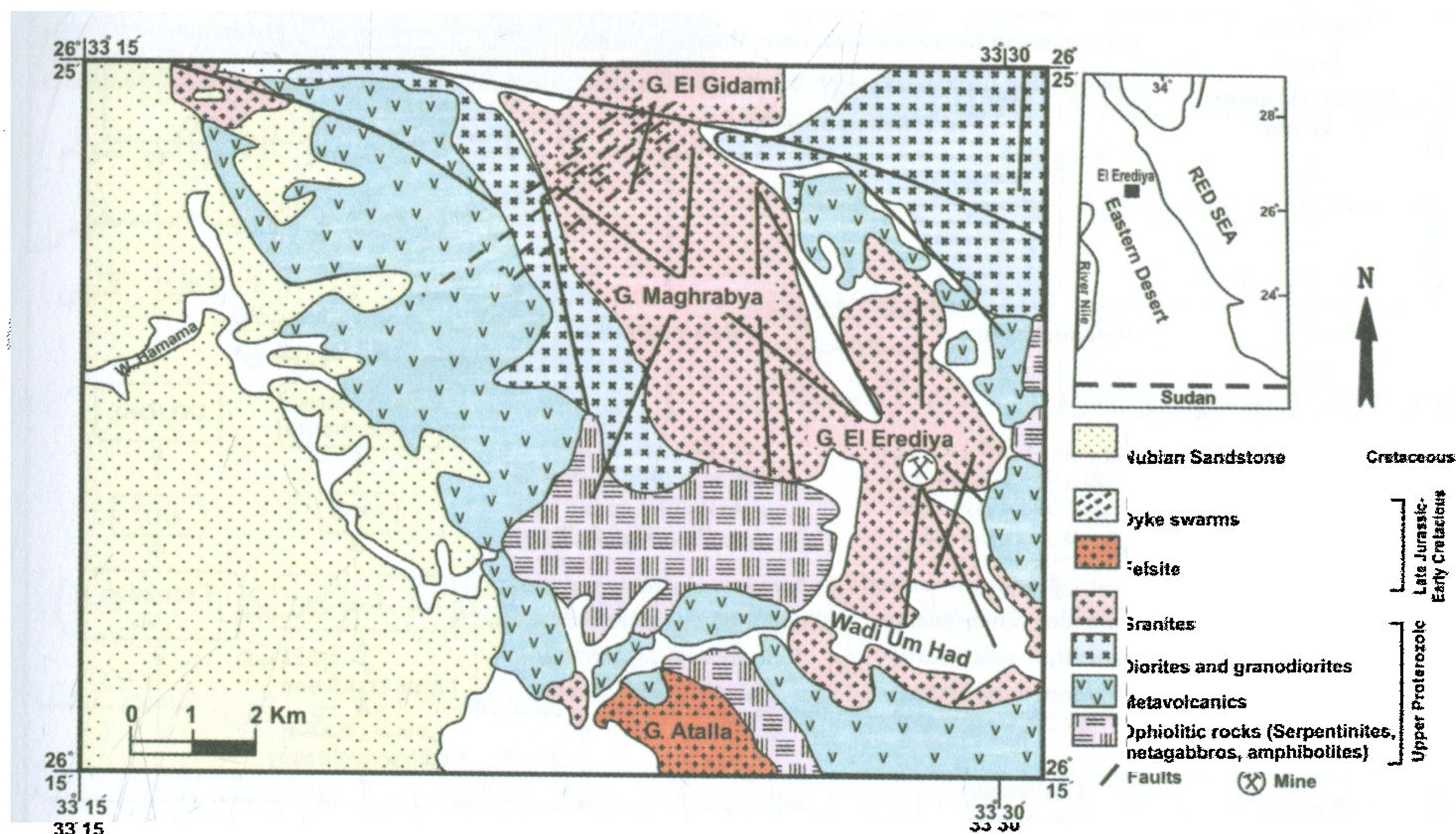


شكل ٤-١٠: نموذج لنشأة معادن اليورانيوم بمنطقة أم آرا (Abd El-Naby, 2009b).

منطقة العرضية El Erediya

تقع منطقة العرضية بالصحراء الشرقية (شكل ٤-١١). تتكون المنطقة من صخور ماقبل الكمبري النارية والمتحولة، والتي تـــشمل صـــخور الأفيوليـــت، والصخور البركانيـــة المتحولـــة، وصـــخور الـــديوريت، والجرانوديوريـــت، والجرانيت، والفلسيت، ومجموعة من عروق الجاسبار، والسدود القاطعـــة (Al-

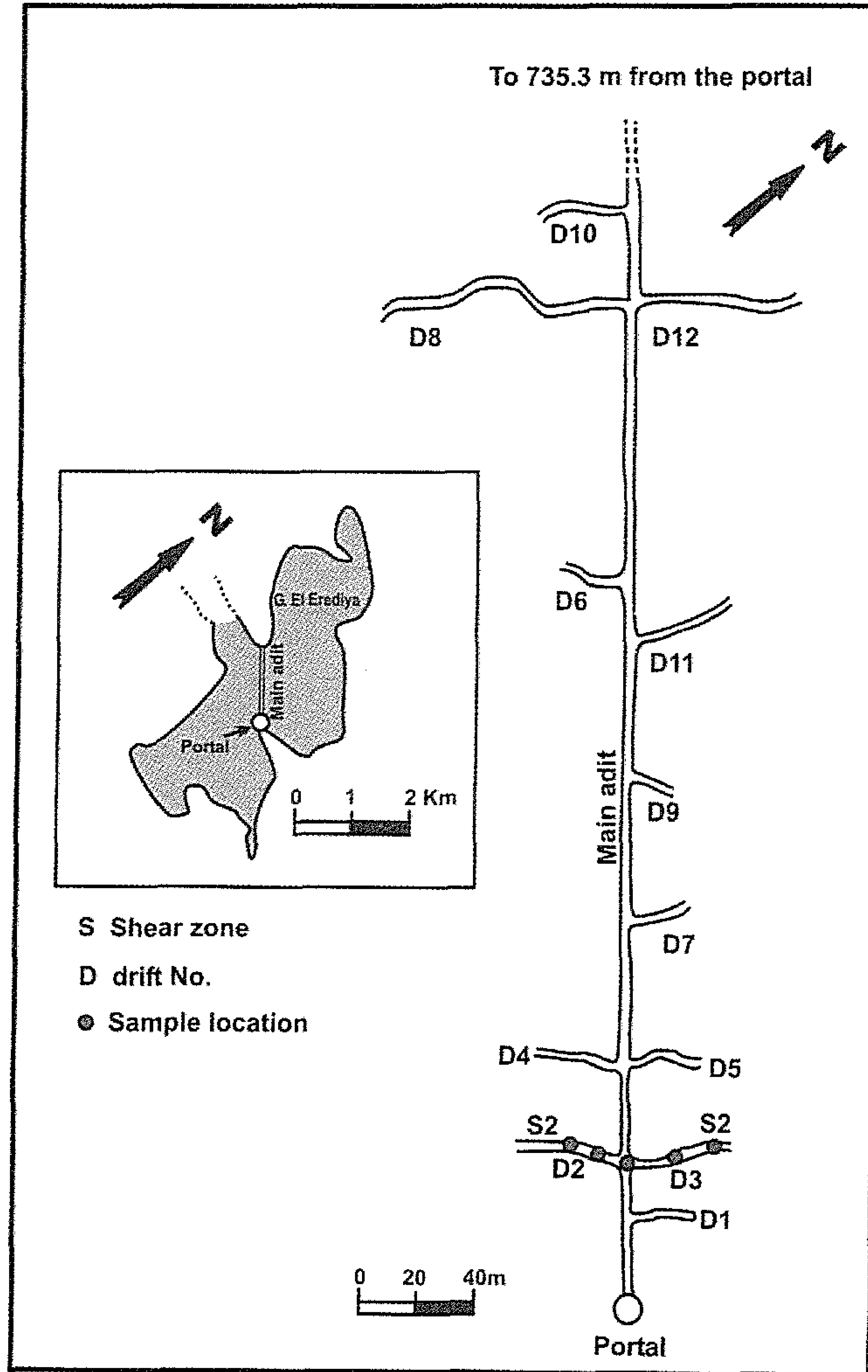
Al-Ksas and ،Hussain *et al.*, 1986 ،Abu-Dief, 1985, 1992 ،Taher, 1985 ،Bakhet, 1989 ،Azmound *et al.*, 1999 و Abu-Deif *et al.*, 2001). تتــأثر تمعدنات اليورانيوم في هذه المنطقة بالتراكيب الجيولوجية المــصاحبة لعــروق الجاسبار (jasperoid) بالصخور الجرانيتية. تُظهر هذه الصخورالعديد من أنواع التغاير، التي أدت إلى عمليات السلكتة (silicification)، وتكوّن المعادن الطينيــة (argillization)، وتكوّن الكلوريت (chloritization).



شكل ٤-١١: خريطة جيولوجية لمنطقة العرضية، الصحراء الشرقية، مصر (Abu-Deif, 1992).

تعكس الصخور الجرانيتية بمنطقة العرضية أعلى قيم تركيزات إشــعاعية نسبة إلى الصخور المحيطة الأخرى. يصل معدل اليورانيوم إلى ٢٣ جزء فــي المليون، والثوريوم ٥٨ جــزء فــي المليــون (Greenberg, 1981). تــصاحب تمعدنات اليورانيوم نطق القص والكسور، المتأثرة بعمليات التغاير الحرمــائي، حيث تمتلئ هذه النطق بعروق الجاسبار. دلت التحاليل الكيميائية لبعض العينات المتمعدنة، على أن محتوى اليورانيوم يتراوح بــين ٢٠٠ و ٦٠٠ جــزء فــي

المليون، بمتوسط ٤٦٢ جزء في المليون، بينما تتراوح قيم الثوريوم بين ١٣ و ١٤ جزء في المليون، بمتوسط ١٥ جزء فـــي المليـــون (El-Kammar *et al.*, 1997).



شكل ٤-١٢: مخطط يبين النفق الرئيسي والأنفاق الجانبية لمنجم العرضية بالصحراء الشرقية، مصر (**Hussin *et al.*, 1986**).

في عام ١٩٨٠، قامت هيئة المواد النووية المصرية، بعمل أنفاق استكشافية بالجزء الجنوبي من جرانيتات العرضية. اتخذ النفق الأساسي اتجاه شمال ٥٠° غرب، عمودياً على نطق القص. تم حفر مجموعة من الأنفاق الجانبية عند نقاط تقاطع النفق الرئيسي، لتتبع التمعدنات بهذه الأنفاق (شكل ٤-١٢). يعكس نطاق القص رقم ٢ (S2)، أعلى تركيزات إشعاعية مقارنةً بالنطق الأخرى. تمتلئ نطق القص بعديد من عروق الجاسبار، المصحوبة بتمعدنات البيتشبلند كمعدن أولي، بالإضافة إلى المعادن الثانوية الأخرى، مثل اليورانوفان، والكاسوليت، والرينارديت (renardite) (Hussin *et al.,* 1986). من المعادن المصاحبة الأخرى: البيريت، والجالينا، والماجنيتيت، والإلمينيت، والهيماتيت، والروتيل، والتيتانيت، والفلوريت، والزركون، والمونازيت، والأباتيت، والتورمالين (El-Kammar *et al.,* 1997). قدّر عمر معدن البيتشبلند بحوالي ١٣٠-١٦٠ مليون سنة، باستخدام طريقة اليورانيوم- الرصاص (U-Pb isochron) (Abu-Deif, 1992).

لقد تم مسح نطاق القص رقم ٢ (S_2)، باستخدام الجهاز الطيفي لأشعة جاما، بواسطة أبو ضيف وآخرون (Abu-Deif *et al.,* 2001). خلصت هذه الدراسة إلى أن الصخور الجرانيتية في منطقة العرضية غنية بالثوريوم، حيث بلغت نسبة اليورانيوم إلى الثوريوم أقل من واحد (eU/eTh < 1). كما أضاف الباحثون بأن مصدر اليورانيوم بنطق القص، هو الجرانيتات نفسها. لقد أشار أوزموند وآخرون (Azmound *er al.,* 1999) عن دور مياه الأمطار في نشأة معادن اليورانيوم الثانوية بمنطقة العرضية. وتوصل الباحثون إلى تحديد عمر المعادن الثانوية بحوالي ٨٠٠٠٠-١٤٠٠٠٠ سنة، باستخدام طريقة الثوريوم[٢٣٢]/اليورانيوم[٢٣٤].

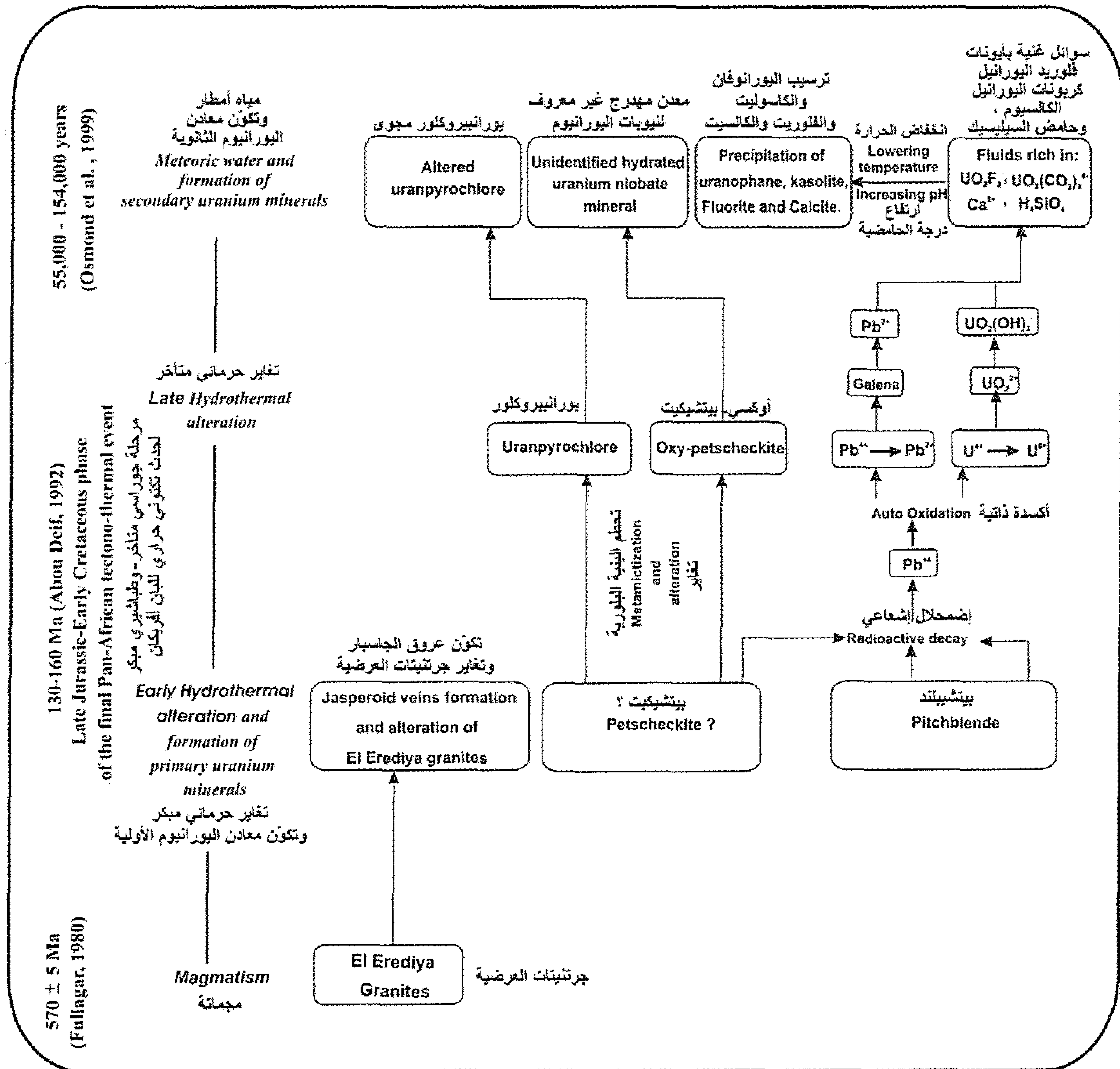
بالإضافة إلى اليورانوفان والكاسوليت كمعادن ثانوية (Azmound *er al.*, 1999)، فقد أشار عبد النبي (Abd El-Naby, 2008) إلى وجود معدن اليورانوبيروكلور (urano-pyrochlore)، ومعدن غير معروف لنيوبات اليورانيوم (شكل ٤-١٣). تم تفسير نشأة هذين المعدنيين على أنهما نتاج تغاير لمعدن يورانيوم أولي، وهو البيتشيكيت (petscheckeite). تم اقتراح نموذج لنشأة عمليات التغاير، والتمعدنات، بمنطقة العرضية (شكل



شكل ٤-١٣: معدن اليورانوبيروكلور ومعدن غير معروف لنيوبات اليورانيوم بالصخور الجرانيتية بمنطقة العرضية (Abd El-Naby, 2008).

٤-١٤)، يشتمل هذا النموذج على مرحلتين أساسيتين. يرجع نشأة المعادن الأولية إلى المرحلة الأولى، من جراء نشاط حرمائي أدى إلى تكوّن عروق الجاسبار، وما تحتويه من معادن اليورانيوم الأولية (منذ حوالي ١٣٠-١٦٠ مليون سنة). ترتبط هذه المرحلة بحادث تكتوني-حراري (tectono–thermal) للحمى الأفريقي (Pan–African)، أثناء عصر الجوراسي المتأخر – الطباشيري المبكر (Late Jurassic-Early Cretaceous). بعد تكّون عروق الجاسبار بالصخور الجرانيتية للعرضية، حدث نشاط حرمائي متأخر أدى إلى عمليات تغاير، مثل تكون المعادن الطينية (argillization)، وعمليات إثراء لعناصر، مثل اليورانيوم، والكالسيوم، والرصاص، والزركونيوم، والسيليكون. أثناء هذه المرحلة، تغاير البيتشيكيت ليعطي يورانوبيروكلور، وأوكسي-بيتشيكيت (oxy-petschekite). غالباً، انتقل اليورانيوم في صورة معقدات كربونات اليورانيل. مع تغير ظروف درجات الحرارة ودرجة الحامضية pH، أصبحت هذه المعقدات

غير مستقرة، واتحدت مع السيليكا، والكالسيوم، والرصاص لتعطي يورانوفان، وكاسوليت. وأخيراً، حدث نوع من التغاير منخفض الحرارة، أدى إلى تغــــاير الأوكسي-بيتشيكيت إلى معدن غير معروف لنيوبات اليورانيوم المهدرجة .



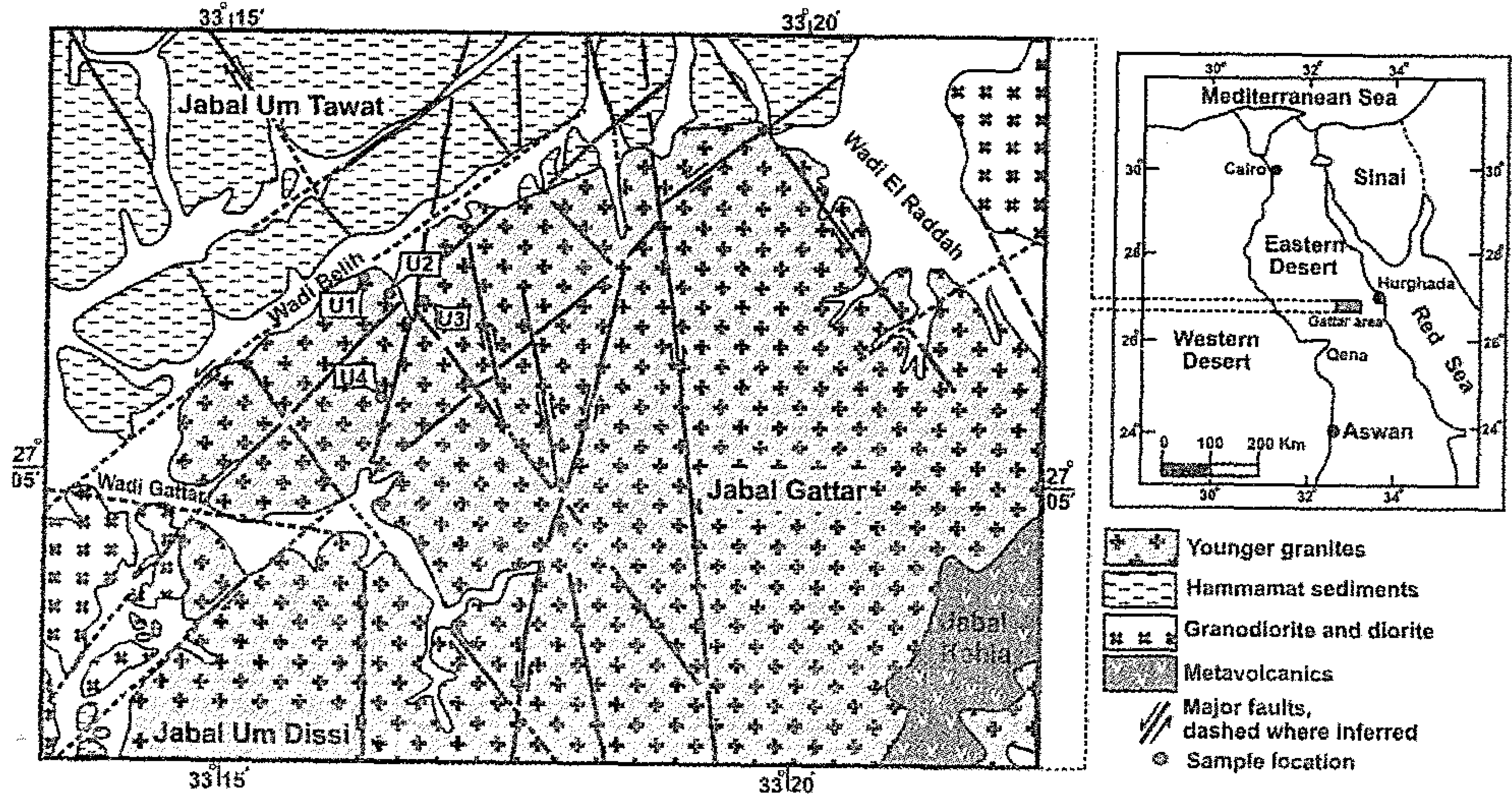
شكل ٤-١٤: نموذج يوضح نشأة تمعدنات اليورانيوم بمنطقة العرضية، مصر (Abd El-Naby, 2008).

جبل جتار Gattar

تمثل تمعدنات اليورانيوم بمنطقة جبل جتار مثالاً من أمثلة ترسيب معـــادن اليورانيوم بواسطة المعادن الطينية. توجد تمعدنات اليورانيوم بعروق صـــغيرة

من الكوارتز، بنطق القص (shear) بالصخور الجرانيتية، الممثلة لجبل جتار (شكل ٤-١٥). يظهر هذا الجرانيت العديد من أنواع التغاير، مثل التحوال الصوديومي والبوتاسي (Na- and K-metasomatism)، عمليات السلكتة (silicification)، وتكّون المعادن الطينية (argillization)، وتكّون معادن الكلوريت (Salman *et al.*, 1986، Helmy, 1999، و El-Kammar *et al.*, 2001). دلت حسابات اتزان الكتلة (mass balance) على فقد عناصر السيليكون، البيريليوم، الرابيديوم، والعناصر الأرضية النادرة، مع اكتساب لعناصر اليورانيوم، واليتريوم، والعناصر الانتقالية (transitional elements) من جراء عمليات التحوال الصودي والبوتاسي (El-Kammar *et al.*, 2001).

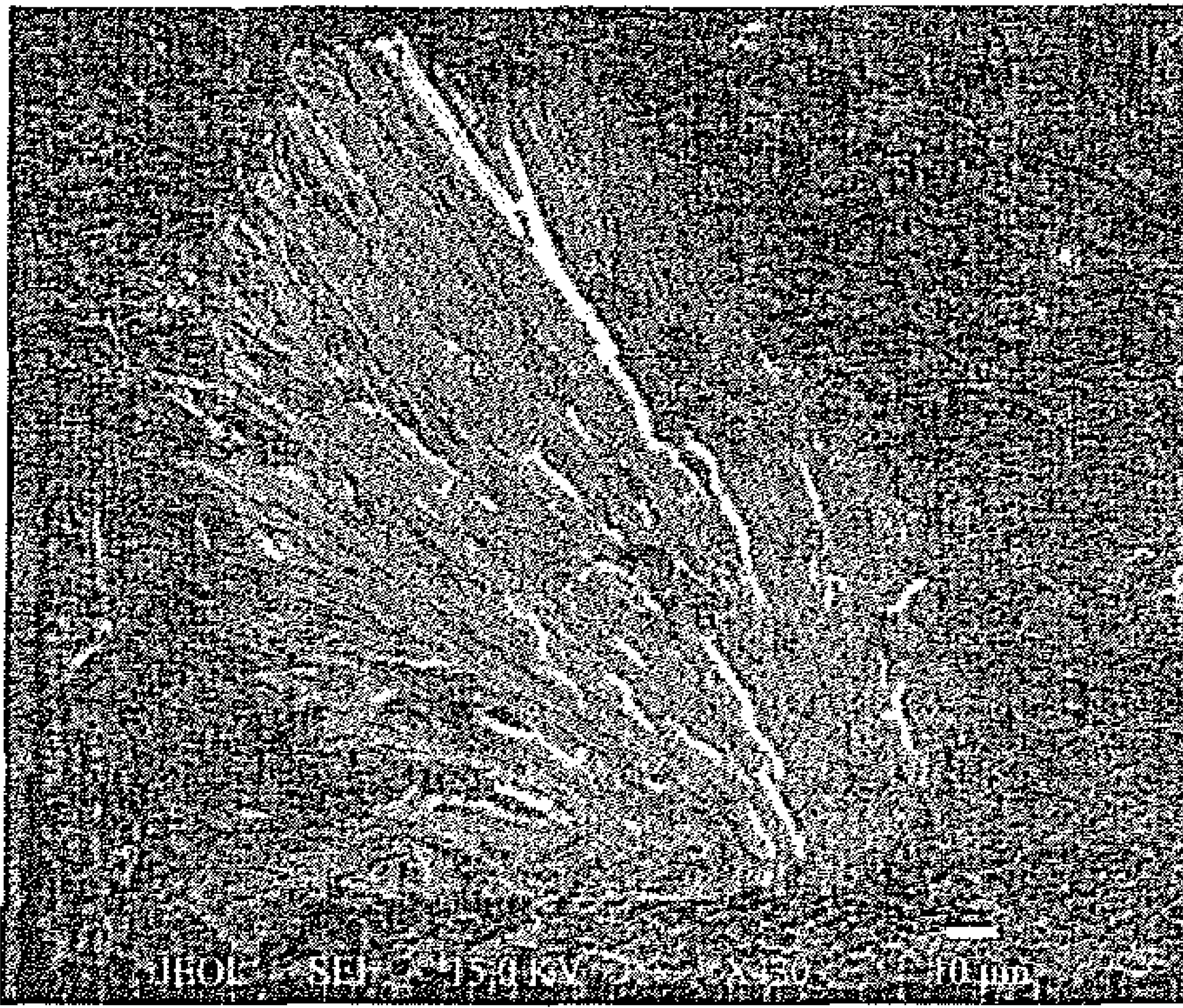
أُكتشف اليورانيوم بمنطقة جتار بواسطة سلمان وآخرون (Salman *et al.*, 1986). بعد ذلك بسنوات، تم التعرف على العديد من مواقع تواجدات اليورانيوم بالصخور الجرانيتية لجبل جتار (Roz, 1994، Nossier, 1996، و Shalaby, 1996). ينحصر وجود تمعدنات اليورانيوم لنطق القص، بين خطوط التماس للجرانيت مع رسوبيات الحمامات (Hammamat). تمثل نطق القص الممرات القديمة للمحاليل الحرمائية، والتي أدت إلى تجوية الجرانيت، وساعدت على تكوين تمعدنات اليورانيوم. توجد هذه التمعدنات على شكل قشور وبقع على أسطح الكسور (Mahdy *et al.*, 1990)، وخصوصاً بصخور الحمامات الرسوبية بالقرب من خط التماس مع الجرانيت. كما توجد بعض التمعدنات بمناطق التغاير الحرمائي بالصخور الجرانيتية بجبل جتار، وخصوصاً بنطق القص والتكسير، والممتلئة بعروق الكوارتز (Salman *et al.*, 1986، Helmy, 1999، و El-Kammar *et al.*, 2001). توجد تمعدنات اليورانيوم بصحبة معادن الفلوريت والكالسيت.



شكل ٤-١٥: خريطة جيولوجية للجزء الشمالي لمنطقة جبل جتار، الصحراء الشرقية، مصر (Roz, 1994).

تتراوح قيم اليورانيوم والثوريوم بالصخور الجرانيتية غير المجواه بين ٤,٩ و ٩,٨ جزء في المليون لليورانيوم، و ١٥ إلى ٢١ جزء في المليون للثوريوم، بينما تتراوح القيم بين ٥,٤ إلى ٤١ جزء في المليون لليورانيوم، و ٢,٨ إلى ٦,٤٦ جزء في المليون للثوريوم بصخور الحمامات الرسوبية (El-Kammar *et al.*, 2001). تزيد تركيزات اليورانيوم والثوريوم بمناطق التغاير، وخصوصاً بصخور الغرين (siltstone) لرواسب الحمامات، حيث تصل قيم اليورانيوم إلى ٤٨٢٤ جزء في المليون، مع قيم منخفضة للثوريوم، يصل متوسطها إلى ٧ جزء في المليون (El-Kammar *et al.*, 2001). دلت الدراسة التي قام بها الصياح وعطاوية عام ١٩٩٠م، على وجود اليورانينيت كمعدن يورانيوم أولي بصخور الجرانيت، رغم أن الدراسات الحديثة لتمعدنات اليورانيوم بجبل جتار، لم تسجل تواجد لمعادن اليورانيوم الأولية (El-Kammar *et al.*, 2001، Dawood, 2003، وAbd El-Naby, 2009c). تتمثل معادن

اليورانيوم الثانوية في اليورانوفان بشكل أساسي، والذي يوجد بمناطق القص التي بها أنواع التغاير المختلفة بصخور الجرانيت، وأيضاً بصخور الحمامات الرسوبية. توجد بلورات اليورانوفان على شكل إبري، وشعاعي باللون الأصفر (شكل ٤-١٦).

شكل ٤-١٦: شكل إبري وشعاعي لليورانوفان بالصخور الجرانيتية لجبل جتار.

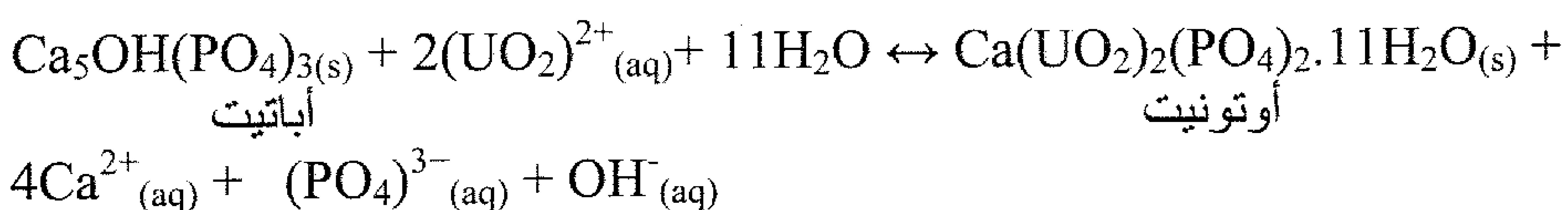
دلت الدراسة التي قام بها عبدالنبي (Abd El-Naby, 2009c)، على أن المعادن الطينية لعبت دوراً هاماً في ترسيب معادن اليورانيوم بنطق القص بمنطقة جتار. تتمثل المعادن الطينية في الكاولينيت والإليت. دل وجود الفلوريت والكالسيت بصحبة اليورانوفان على احتمالية انتقال اليورانيوم في المحاليل على صورة معقدات فلوريد، وكربونات اليورانيل. كما دلت هذه الدراسة على أن عملية الادمصاص (sorption) لليورانيوم على أسطح المعادن الطينية لم يكن لها دور أساسي في ترسيب اليورانيوم، ويرجع ذلك إلى وجود معقدات الكربونات بالمحاليل، والتي تزيد من درجة ذوبانية اليورانيوم. بينما يرجع ترسيب اليورانيوم إلى انحلال (dissolution) معادن الفلسبار، مما أدى إلى انطلاق أيونات الكالسيوم والسيليكات SiO_4 من أسطحه، حيث تصطدم هذه الأيونات مع

اليورانيوم، وتزيد فرصة ترسيب (precipitation) اليورانوفان على أسطح المعادن الطينية (Abd El-Naby, 2009c).

منطقة جبل سيله Sela

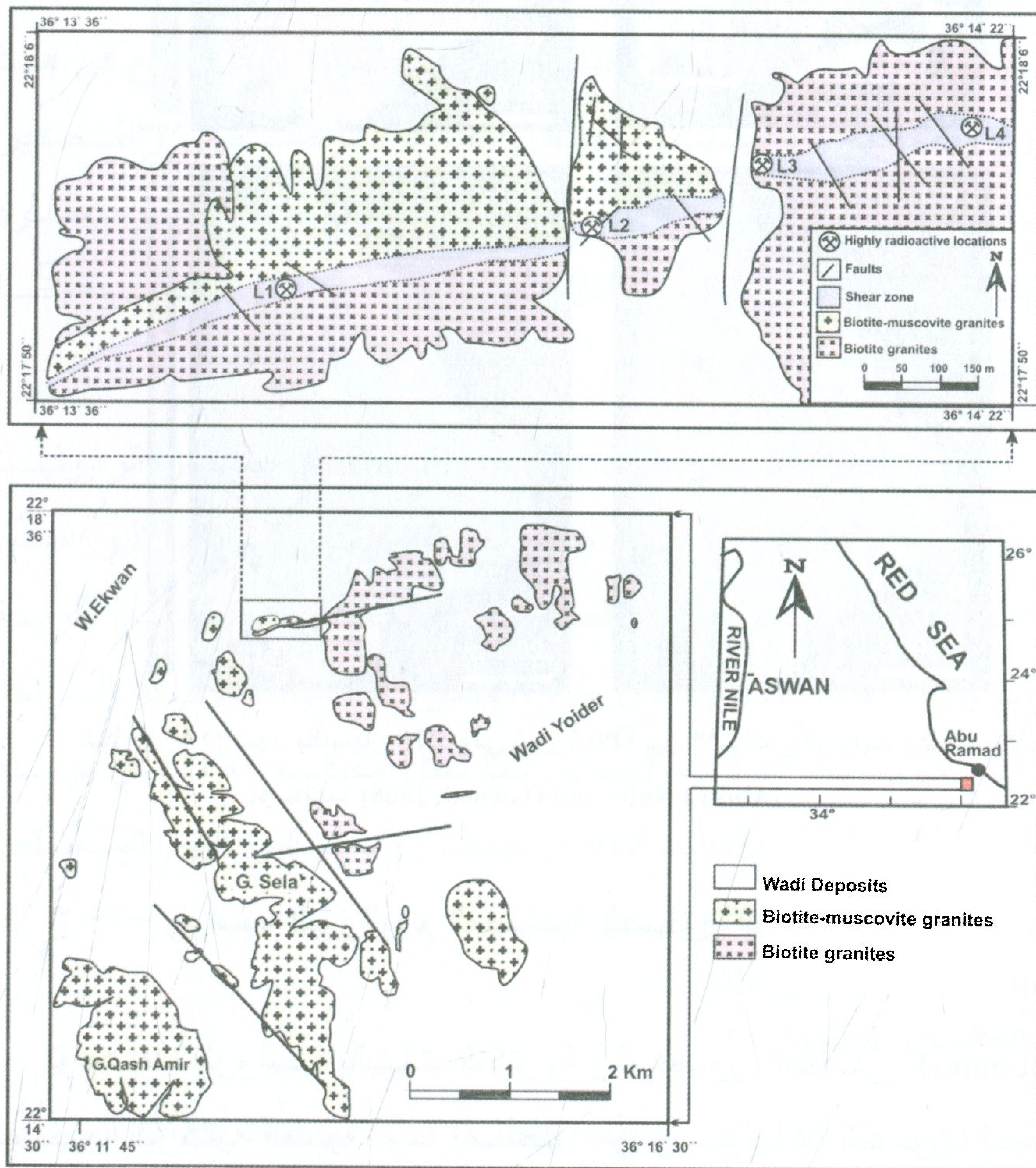
تمثل منطقة جبل سيله مثالاً آخر من أمثلة تواجدات اليورانيوم بنطق القص بالصخور الجرانيتية بجنوب الصحراء الشرقية المصرية (شكل ٤-١٧). تظهر دلالات نشاط المحاليل الحرمائية، وعمليات التغاير بوضوح، خلال نطق القص. دلت دراسات المسح الطيفي لأشعة جاما (X-ray spectrometry) على وجود بعض التركيزات الإشعاعية بنطق القص، للصخور الجرانيتية (شكل ٤-١٧)، تتميز هذه الشاذات بنسبة عالية لمكافيء اليورانيوم إلى الثوريوم (eU/eTh)، وأيضا مكافيء اليورانيوم إلى البوتاسيوم (eU/K) (Gaafar *et al.*, 2006). تم التعرف على معادن اليورانيوم بنطق القص بواسطة إبراهيم وآخرون (Ibrahim *et al.*, 2007)، مثل معادن اليورانوفان والأوتونيت، مع وجود البيتشبلند في بعض الخنادق (trenches) المحفورة بنطاق القص.

دلت دراسة عبد النبي وداود (Abd El-Naby and Dawood, 2008) على تكّون معدن الأتونيت على حساب معدن الأباتيت، من خلال عمليات انحلال للأباتيت (dissolution) وترسيب معدن الأتونيت، تحت ظروف درجة حامضية (pH) تتراوح بين ٣ و٦,٨. بالإضافة إلى ذلك، فقد حدث إحلال لأيون اليورانيل UO_2^{2+} محل الكالسيوم (Ca^{2+}) المتواجد بالأباتيت، حسب المعادلة التالية:

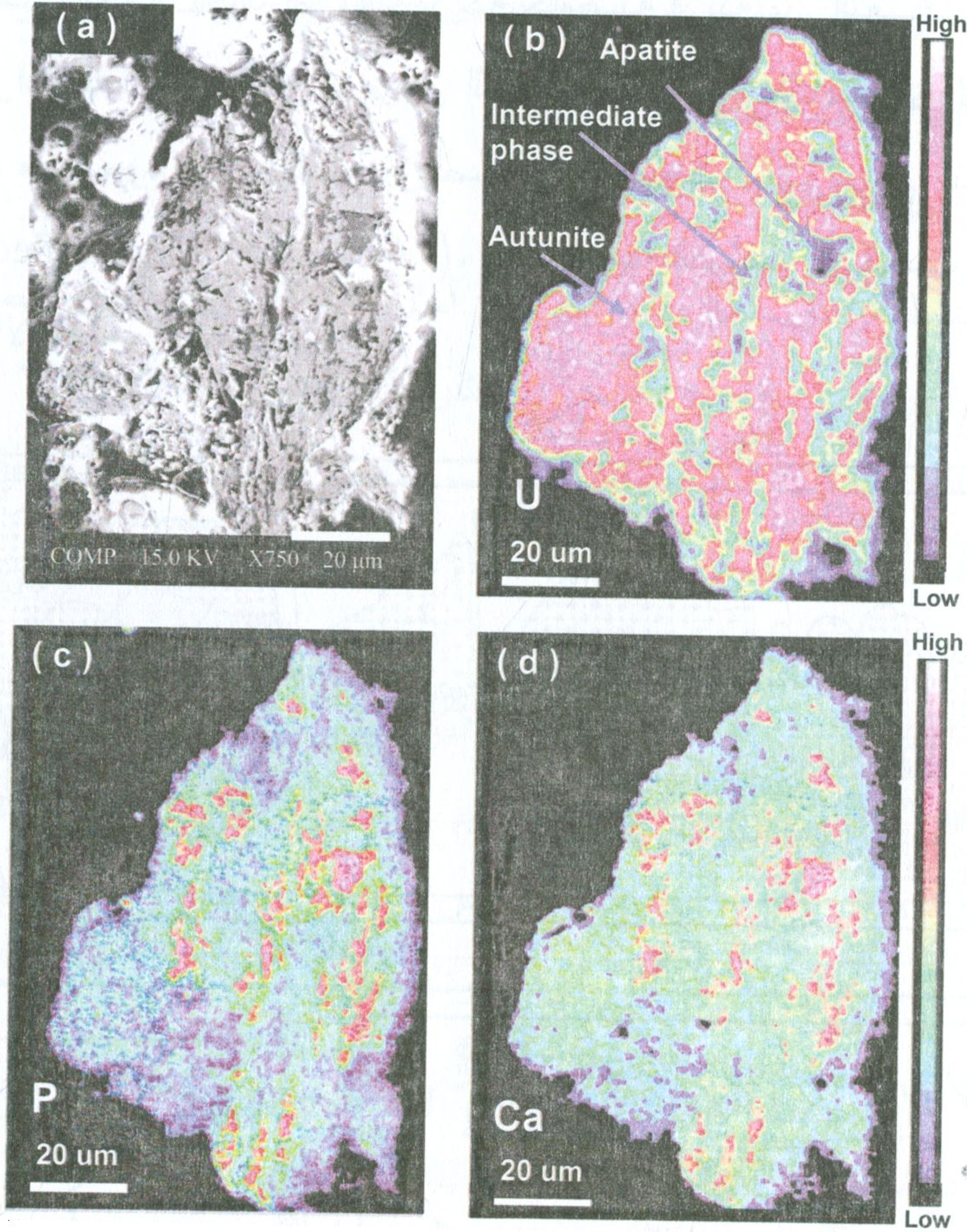


$$Ca_5OH(PO_4)_{3(s)} + 2(UO_2)^{2+}_{(aq)} + 11H_2O \leftrightarrow Ca(UO_2)_2(PO_4)_2.11H_2O_{(s)} + 4Ca^{2+}_{(aq)} + (PO_4)^{3-}_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$$

تم هذا الإحلال تحت ظروف درجة حامضية قريبة من التعـــادل (neutral) مع تركيزات قليلة من اليورانيوم في المحلول. نتج عن ذلك تحول الأباتيت إلى أوتونيت، مع وجود الأول كبقايا، ويفصل بينهما صنف ثالث لم يتم التعرف عليه (unidentified phase) (شكل ٤-١٨)، يتوسط هذا الصنف التركيـــب الكيمـــائي لكل من الأباتيت والأتونيت.



شكل ٤-١٧: خريطة جيولوجية لمنطقة سيلة، جنوب الصحراء الشرقية، مصر (Gaafar *et al.*, 2006).



شكل ٤-١٨: صور بالمسبار الإلكتروني تبين العلاقة بين الأباتيت والأوتونيت والصنف الذي يتوسطهما (Abd El-Naby and Dawood, 2008).

٤-٢- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور البركانية

Volcanic Uranium Deposits

توجد هذه الرواسب بالبنيات التكتونية والمحصور الطبقي (stratabound) بالصخور البركانية الفلسية، وما يصاحبها من رسوبيات. تتكون الصخور البركانية في المراحل المتأخرة من الحدث التكتوني (late to post orogenic)، أو في بيئة تباعدية قارية. عادةً تكون هذه الصخور البركانية من النوع تحت القلوي

إلى فوق القلوي، رغم أنه أحيانا يتركز اليورانيوم بصخور ذات قلوية متوسطة. في كثير من الأحيان، يتأثر الصخر الحاوي على اليوانيوم بعمليات تغاير مثل الألبتة، وتكوّن معادن الكربونات (carbonatization)، وتكوّن أكاسيد الحديد. كما توجد رواسب اليورانيوم بالصخور البركانية الفلسية إلى المتوسطة، والصخور الفتاتية البركانية، والبنيات المصاحبة لهبوط الكالديرا، وصخور السدود الحلقية (ring dykes). توجد التمعدنات على شكل عروق، أو منتثرات (disseminated) بالتدفقات البركانية، أو الرسوبيات الفتاتية. يوجد البيتشبلند بشكل شائع في هذه الصخور، ويصاحبه الموليبدنيت، وبعض معادن الرصاص، والقصدير، والتنجستن، مع الفلوريت، والكوارتز، والكالسيت. من الممكن أن تحتوى الرسوبيات البركانية على آلاف الأطنان من أكسيد اليورنيوم، بدرجة خام تتراوح بين ٠،٠٢ – ٠،٢٪ U_3O_8.

من أمثلة هذه الرواسب، رواسب ميشيلين (Michelin) بصخور الرايوليت بمنطقة لابرادور (Labrador) بكندا. هناك احتمالان لتكوّن رواسب اليورانيوم بهذه الصخور، إما مصاحبة لتكوّن الصخور البركانية، أو لاحقة عن طريق تدوير محاليل منخفضة الحرارة مثل مياه الأمطار، أو المياه الجوفية الساخنة الغنية باليورانيوم نتيجة عمليات التجوية. كما تمثل منطقة العطشان بوسط الصحراء الشرقية المصرية، أحد أمثلة تواجدات رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور البركانية القلوية (التراكيت).

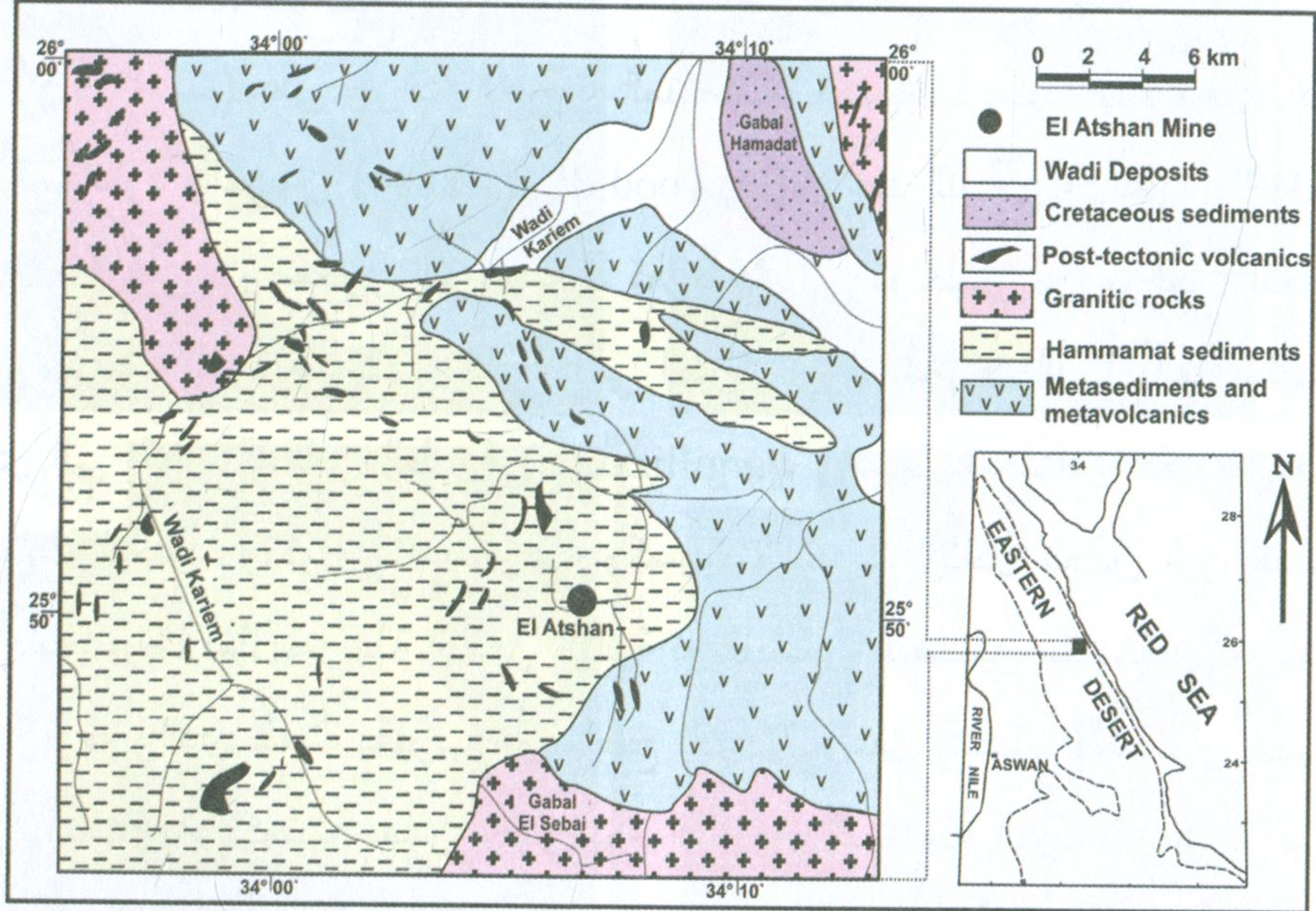
منطقة العطشان Atshan

تعتبر تمعدنات اليورانيوم بمنطقة العطشان مثالاً جيداً لتواجدات اليورانيوم بالصخور البركانية (شكل ٤–١٩). كما أن منطقة العطشان تعتبر فرصة جيدة لدراسة تأثير عمليات التغاير مرتفعة الدرجة، ومنخفضة الدرجة على المعادن

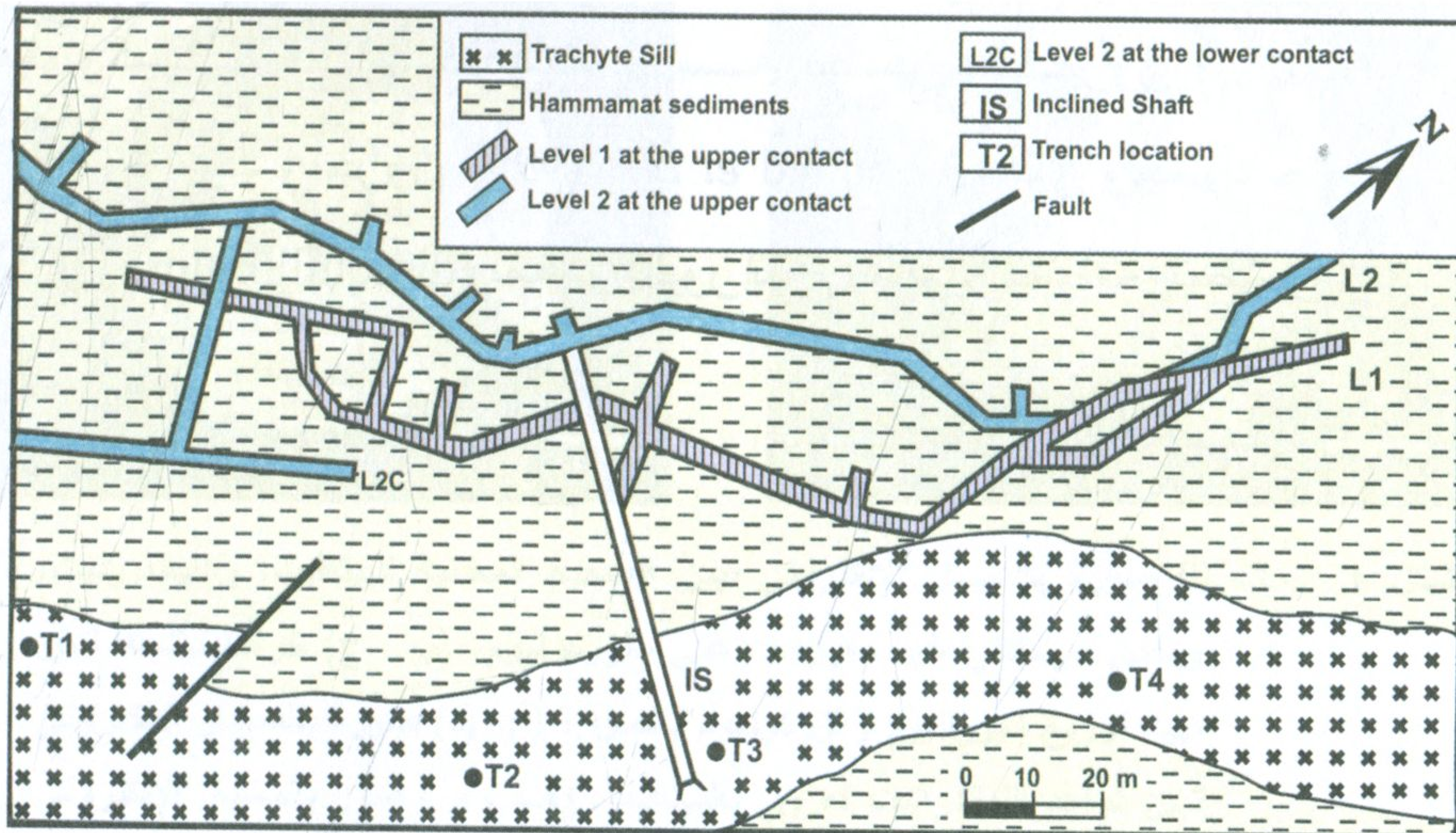
الحاوية على اليورانيوم، والزركونيوم، بالصخور البركانية. سابقاً، عُرفت هـذه الصخور على أنها بستونيت (bostonite) (الحـاذق ١٩٦٨، Attawiya, 1971، وHussein and El-Kassas, 1972)، ولكن حديثاً صنفت هذه الصخور على أنها تراكيت (trachyte) بناءً على تركيبها الكيميائي (Dawood *et al.,* 2004). دلـت بعض الدراسات على وجود معادن يورانيوم أولية مثل الكوفينيت، والبيتشبلند (Obrenovic *et al.,* 1966، والحاذق ١٩٦٨)، بينما تتمثل معـادن اليورانيـوم الثانوية في اليورانوفان، والكاسوليت، والـصودييت، والجاميـت، والـشوبيت، وشـروكينجيريت (schroeckingerite)، ورازرفـوردين (rutherfordine)، وتسيبيت (zippite)، ويورانوبيلليت (uranopilite) (Attawiya, 1971) ، ولكن لم يتم التعرف إلا على الصودييت، والكاسوليت، واليورانوفان بالدراسات الحديثـة (Azmouond, 1999، وDawood *et al.,* 2004). كما تم التعرف علـى معـادن البيتافيت (betafite) والليانذريديت (liandratite) (شكل ٤-٢٠)، ومعدن غيـر معروف لسيليكات الزركونيوم واليورانيوم، قـد يكـون نـاتج عـن تجويـة الزركونوليت، (Abd El-Naby, 2009a). ومن المعـادن المـصاحبة، البيريـت (pyrite)، والكالكوبيريت (chalcopyrite)، والجالينـا (galena)، والموليبـدينيت (molybdenite)، والكوفيلليـت (covellite)، والكالكوسـيت (chalcosite)، والماركزيت (marcasite).

تنحصر تمعدنات اليورانيوم بشكل عام بالبنيات الجيولوجية، حيـث توجـد مالئة لبعض الكسور الناتجة عن قوى شد، والمتـصلة بنطـاق التمـاس بـين التراكيت الذي يتواجد على شكل سـد مـوازي (sill)، وصـخور الحمامـات الرسوبية المتورقة، التي بأعلاه وأسفله (شكل ٤-١٩ب). عموماً، فإن سـطح التماس العلوي أكثر تمعدناً من السطح السفلي. تتمثل عمليات التغاير الحرمائي المصاحب لتمعدنات اليورانيوم بصخـور التراكيت بمنطقة العطشان، في تكون

(أ)

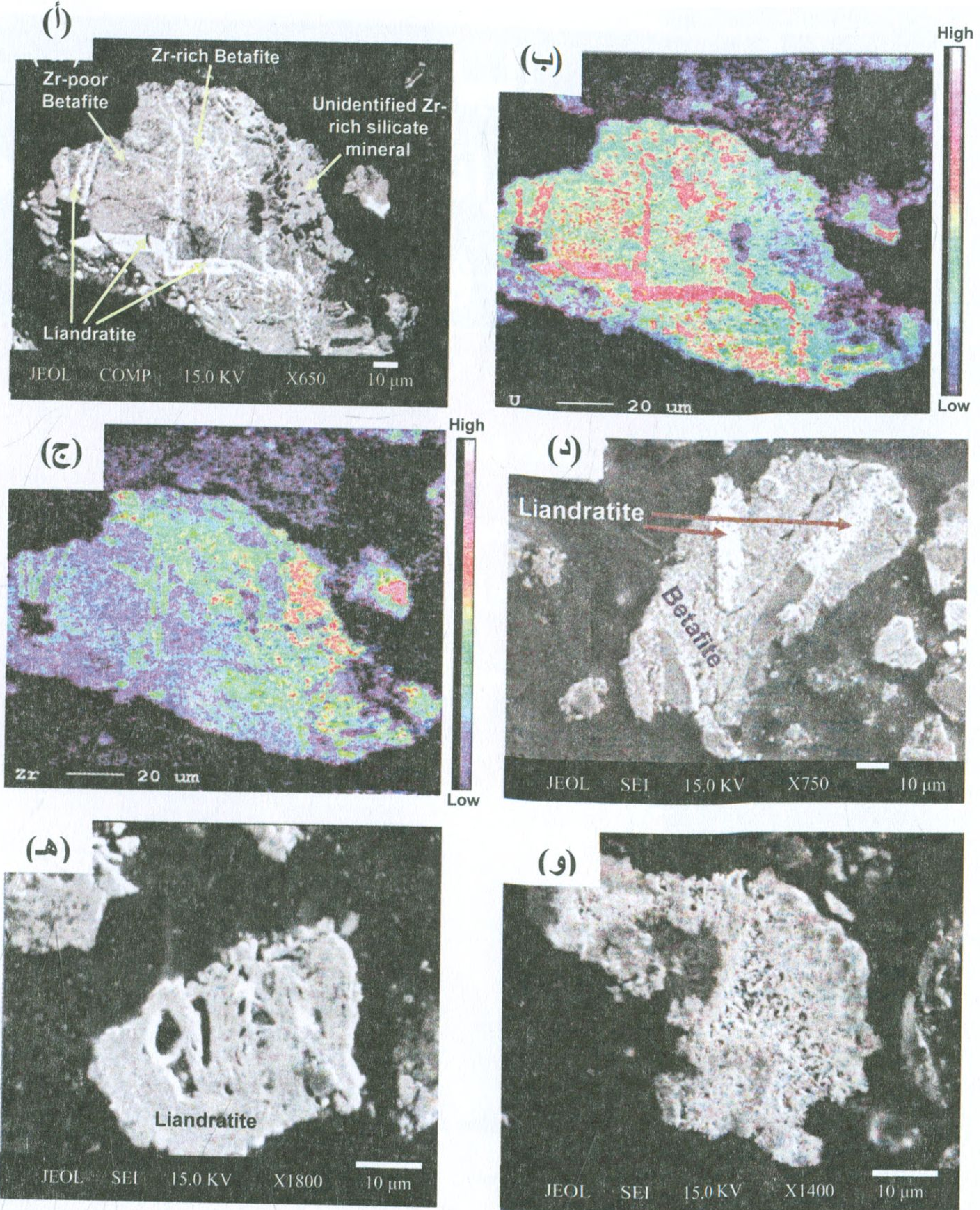


(ب)



شكل ٤-١٩: (أ) خريطة جيولوجية لمنطقة العطشان. (ب) مخطط يبين مواقع الحفر والمستويات المختلفة بمنجم العطشان (الحاذق ١٩٦٨).

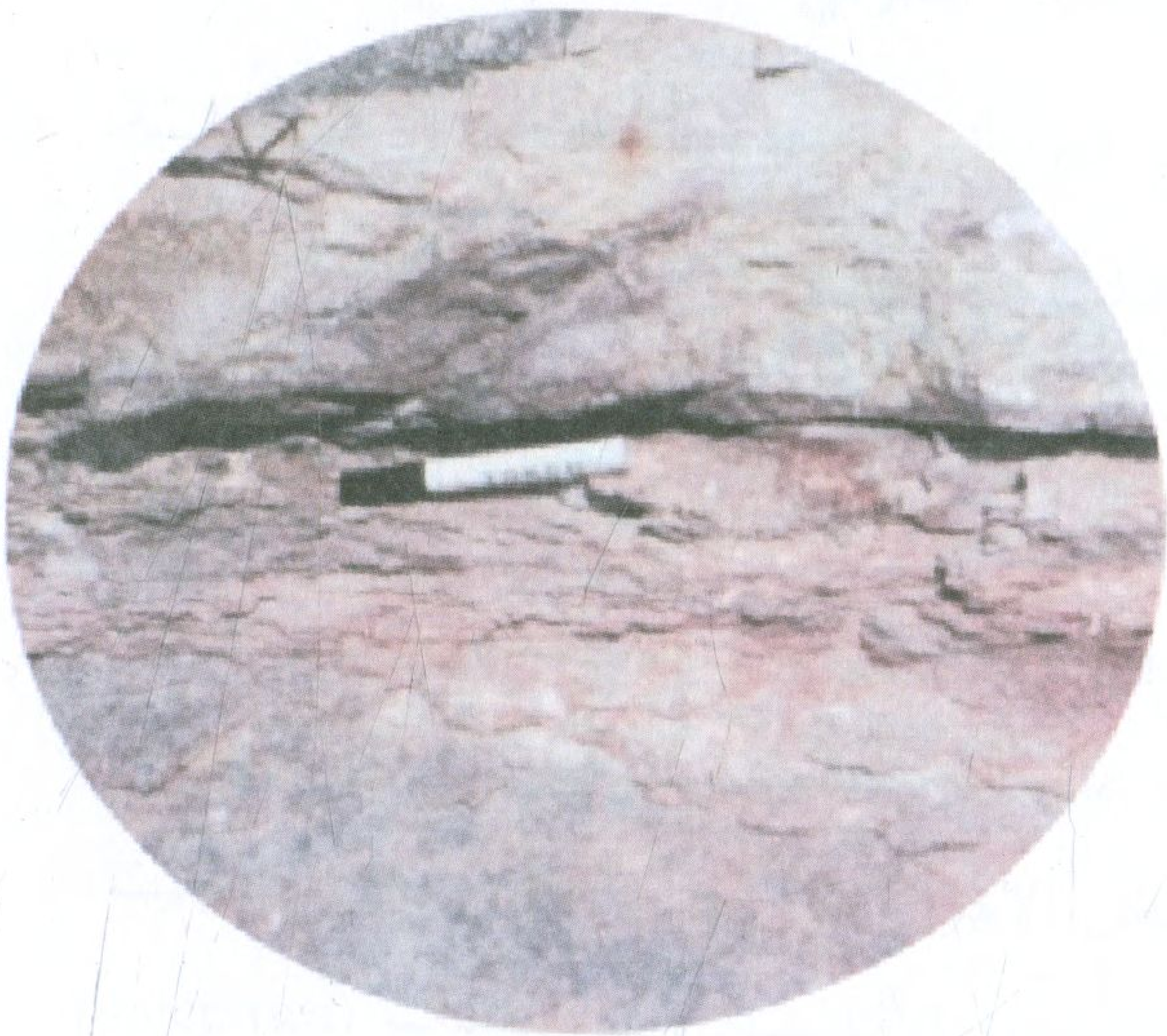
معادن الهيماتيت (hematitization)، والكاولينيت (kaolinitization)، ومعادن الكربونات (carbonatization). توجد تلك التغيرات على شكل نطاقات ضيقة (٠,١ – ١ سم) على حواف العروق المتمعدنة، كما توجد منبثة بالتراكيت. دلت دراسة داود وآخرون (Dawood *et al.,* 2004)، وعبد النبي (Abd El-Naby, 2009a) على أن صخور التراكيت قد تعرضت إلى مرحلتين من مراحل التغاير. في المرحلة المبكرة، حدث تغاير عالي الحرارة بواسطة المحاليل الحرمائية، أدى إلى تكّون المعادن الطينية (argillization)، وانحلال معادن الكبريتيدات الحاملة للحديد، وتكّون أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد، وتآكل معادن اليورانيوم الأولية. بينما تمثل مرحلة التغاير الثانية نوعًا من التغاير منخفض درجة الحرارة، والذي حدث بالقرب من سطح الأرض، بفعل مياه الأمطار تحت ظروف قلوية. تكونت معادن اليورانيوم الثانوية، أثناء هذه المرحلة عن طريق ترسيب اليورانيوم، وما يصاحبه من العناصر الأرضية النادرة، في الشقوق والفواصل عن طريق ادمصاصه بالمعادن الطينية، ومصاحباً لأكاسيد وهيدروكسيدات الحديد. كما دلت دراسة حسين وآخرون (Hussein *et al.,* 1970) وأزموند وآخرون (Azmound *et al.,* 1999) على وجود حالة عدم الاتزان (disequilibrium) لمعادن اليورانيوم الثانوية بمنطقة العطشان.



شكل ٤- ٢٠: (أ) صورة بالمسبار الإلكتروني تبين الصحبة المعدنية للبيتافيت، واللياندريديت، ومعدن سيليكاتي غير معروف وغني بالزركونيوم. (ب ، ج) خرائط بأشعة أكس تبين توزيع اليورانيوم والزركونيوم بالصورة (أ). (د) صورة بالمسبار الإلكتروني تبين تواجد الليانداراتيت كعروق بالبيتافيت. (هـ ، و) صور بالمسبار الإلكتروني تبين البنية الليفية (fibrous) لمعدن الليانداراتيت (Abd El-Naby, 2009a).

الباب الخامس
رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة وعمليات التحوال

- مقدمة
- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة
- رواسب اليورانيوم التحوالية



١ – مقدمة

توجد رواسب اليورانيوم التحوليــة بالــصخور الرســوبية، أو البركانيــة المتحولة، حيث لا يوجد دليل مباشر على تكّون رواسب اليورانيوم من عمليات لاحقة لعمليات التحول. يوجد اليورانيوم في هذه الرواسب على صورة بيتشبلند ويورانينيت، غالباً يكون الخام مــنخفض الدرجــة (٠,٠٠١–٠,٠١٥٪ U_3O_8)، ويحتوي على أقل من ١٠٠٠ طن أكسيد اليورانيوم. من أمثلة رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة، منطقتي فورستاو (Forstau) بالنمــسا ومــاري كاثلين (Marry Kathleen) بشمال غرب كوينزلانــد (Queens land). تكونــت الرواسب بهاتين المنطقتين أثناء عملية التحول الأقليمي لصخور سابقة التكــوين غنية باليورانيوم. نتجت هذه الرواسب من جراء عملية تدوير واســعة النطــاق لمحاليل تحولية–حرمائيــة للصخور الــسيلكاتية الجيريــة (calc-silicate rocks) مكونةً صخور السكارن الغنية بــاليورانيوم، والعناصــر الأرضــية النــادرة، والملاصقة لصخور جرانيتية سابقة للحدث التحولي.

هناك أنواع أخرى من رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولــة، والتي توجد على شكل عدسات، وعروق صغيرة بنطق القــص (shear zones)، أو مصاحبة لأنواع التحــول التهــشمي (cataclastic metamorphism) بنطــق التصدع. من أمثلة تواجد هذه الرواسب: منطقة بيفرلودج (Beaverlodge) بكندا، حيث يتراوح متوسط درجة الخام بين ٠,٢٪ إلى ٠,٤٥٪ أكــسيد اليورانيــوم. يحتوى الجزء العلوي من العروق، على اليورانينيت والبرانيريت (brannerite)، ويزداد تواجدهما مع العمق. في بعض الأجزاء من العروق، قد يوجد الكوفينيت، ومواد عضوية غنية باليورانيوم، وبعــض الأكاســيد وســالينيدات (selenides) الحديد، والنحاس، والرصاص، والزنك، وكبريتيدات الرصاص. دلــت دراســة

المكتنفات السائلة (fluid inclusions) بالكوارتز، والكربونات، على أن المحاليل الحاوية على اليورانيوم كان مصدرها الصخر الأصلي من جراء تفاعلات تبادلية، عند درجات حرارة تصل إلى ٥٠٠ درجة مئوية في البداية، وتنتهي إلى ٨٠ درجة مئوية (Sassano, 1972).

كما توجد تمعدنات اليورانيوم بأماكن عديدة باستراليا، ففي الشمال توجد أهم رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة بمنطقة أليجاتور ريفيرز (أنهار التماسيح)، بشمال استراليا، والتي تضم مناجم كونجارا (Koongarra)، ونابارليك (Nabarlek)، ورينجير ١ (Ranger1) (شكل ٥-١)، ويوجد في الجنوب منجم راديوم هيل (Radium Hill)، والذي يعد من أول المناجم المكتشفة في استراليا عام ١٩٠٦م، بواسطة المستكشف سميث (A.J. Smith)، والذي اعتقد في البداية، أن الصخر الأسود الغامق بهذا المنجم هو خام للقصدير. ومن الأمثلة الأخرى لتواجدات اليورانيوم بالصخور المتحولة، منطقة أبو روشيد بوسط الصحراء الشرقية المصرية، ولكن لم يتم تقييم الخام بعد.

٢- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة

٢-١- رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور المتحولة باستراليا

منجم كونجارا Koongarra

تم اكتشاف منجم كونجارا عام ١٩٦٩م، عن طريق مسح إشعاعي جوي أجرته مؤسسة نوراندا (Noranda LTD) بمنطقة أليجاتور ريفيرز. تبع ذلك مسح إشعاعي أرضي، حيث تم تحديد بعض الشاذات الإشعاعية، التي تصل إلى ٥٣٠٠ عدة في الثانية (CPS). ترجع هذه الشاذة الإشعاعية إلى وجود معادن يورانيوم ثانوية، بصخور الشيست المجواه. يصل إجمالي كمية الخام إلى ٣,٥

مليون طن، تحتوي على حوالي ١٣٠٠٠ طـن يورانيـوم. توجـد تمعـدنات اليورانيوم على شكل جسمين من الخام ذوي علاقة ببعضهما الـبعض، ولكـن يفصل بينهما ١٠٠م من صخور الشيست الخالية من اليورانيوم. يـصل نطـاق التمعدنات إلى ٦٥٠ مترًا في الطول، بمضرب ناحية الشمال الـشرقي، ويميـل بقيمة ٥٥° ناحية الجنوب الشرقي. تتمثل معادن اليورانيوم الأولية فـي معـدن اليورانينيت (UO_2)، والذي يوجد على شكل عروق ذات سمك ١-١٠ ميليمتر، وبصحبة من الكلوريت الغني بالماغنسيوم. يوجد بالخام كميـات ضـئيلة مـن الذهب، ومعادن كبريتيـدات النحـاس، والرصـاص، علـى شـكل منبثـات



شكل ٥-١: خريطة تبين توزيع تواجدات اليورانيوم باستراليا.

[From: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)

(disseminated) في الخام. ومن المعادن الثانوية : سيلييت (saleeite)، ميتاتوربينيت (metatorbenite)، ورينارديت (renardite). توجد هذه المعادن بنطاق التجوية فوق الخام، ولكن في نطاق الخام الأولي، فإن اليورانينيت يتأكسد إلى معادن سيليكات اليورانيوم، مثل الكاسوليت (kasolite)، سكلودوسكيت (sklodowskite)، ويورانوفان.

منجم نابارليك Nabarlek

تم اكتشاف منجم نابيرليك (Nabarlek) عام ١٩٧٠م، عن طريق مسح أرضي لاحق لتحديد شاذة إشعاعية بواسطة المسح الجوي. يرجع وجود هذه الشاذة الإشعاعية إلى وجود عروق من البتشبلند أسفل سطح الأرض بحوالي واحد متر. تصل كمية الخام إلى ٦٠٠٠٠ طن، محتوياً على حوالي ٩٢٠٠ طن يورانيوم. توجد تمعدنات اليورانيوم بصخور الميتابيلليت الغنية بالحديد، وأيضاً بصخور الأمفيبوليت. يصل طول جسم الخام إلى ٢٥٠ مترًا وسمك ٧ أمتار. توجد معادن اليورانيوم الأولية بالجزء العلوي من جسم الخام، وتتمثل في الكوفينيت (coffinite). بينما توجد معادن اليورانيوم الثانوية في نطاق التجوية بالقرب من السطح، وتتمثل في سكلودووسكيت، رازرفوردين (rutherfordine)، كاسوليت، كوريت (curite)، توربيرنيت (torbernite)، وأوتونيت (autunite).

منجم رينجير ١ Ranger 1

تم تحديد حوالي ٩ شاذات إشعاعية في منطقة رينجير ١ في عام ١٩٧٠م، تبع ذلك عمليات مسح إشعاعي أرضي، وجيوكيميائي، مع عمليات تخريط جيولوجي لتحديد مناطق تمعدنات اليورانيوم، تم بالفعل تحديد موقعين للخام هما: رقم ١ و٣ عن طريق شركة بيكو الاسترالية لأعمال المناجم (Peko Mines NL) (شكل ٥-٢)، جاء ذلك بحفر مجموعة من الآبار على نظام شبكي بمسافات

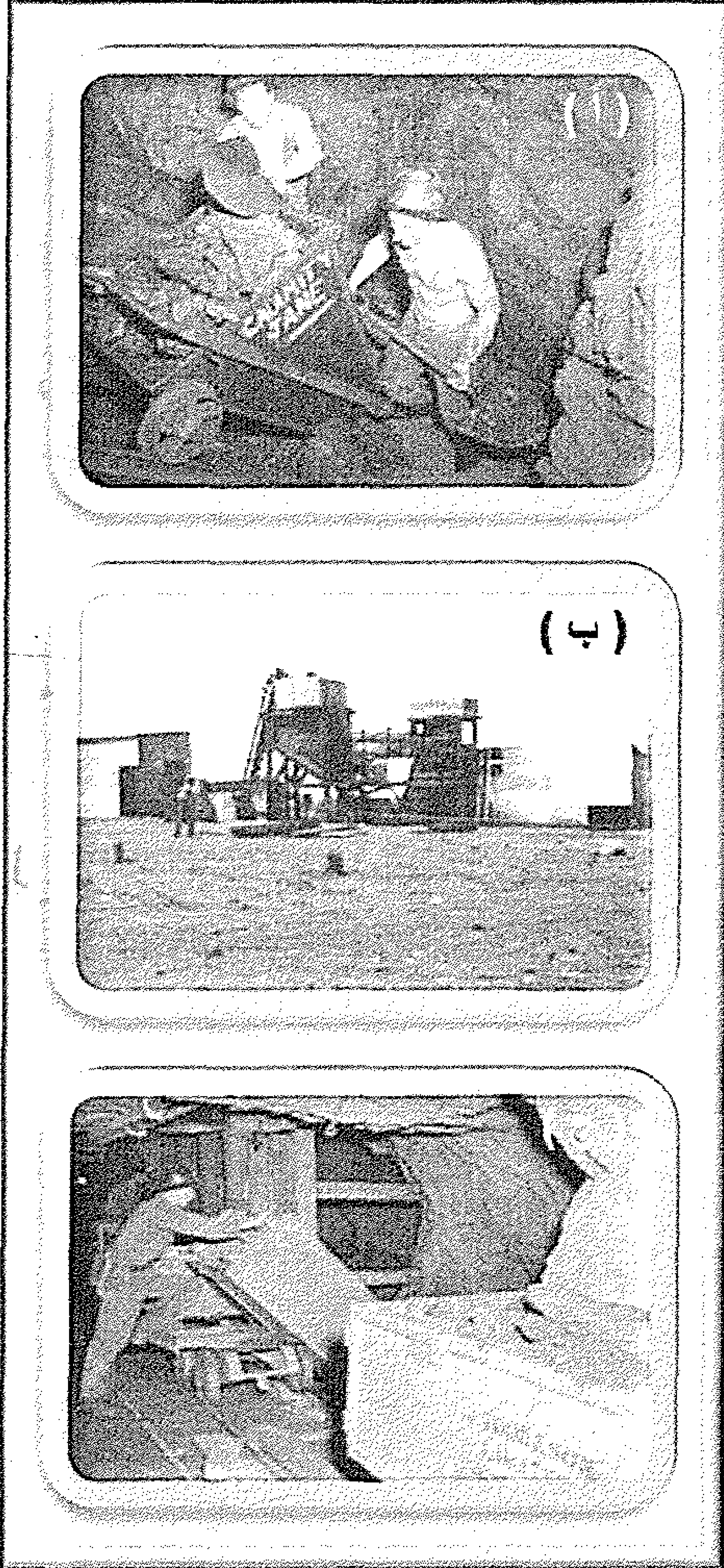
بينية تصل ١٠٠ متر، وبعمق حوالي ١٠٠ متر. يحتوي الخام على حوالي ٧٣٠٠٠ طن يورانيوم، والذي يقع ببنية جيولوجية على شكل حوضي (basin)، عند أو بالقرب من السطح. توجد التمعدنات على شكل حبيبات دقيقة من البيتشبلند، بعروق يصل اتساعها إلى أقل من ١٠ ميليمترات، كمنبثات بصخور شيست الكلوريت الغني بالماغنسيوم. تتراوح درجة الخام بين ٠,٣٪ و ٠,٤٪ أكسيد اليورانيوم U_3O_8. يوجد كمية قليلة من معدن البرانيريت (brannerite)، ومعادن يورانيوم أولية أخرى تحتوي على التيتانيوم والفوسفور. يصاحب معادن اليورانيوم تركيزات، ليست اقتصادية بالدرجة الكافية، من النحاس، والرصاص، والذهب. من المعادن الثانوية بنطاق التجوية وبالقرب من السطح: معادن فوسفات اليورانيوم، مثل الساليت (saleeite)، وسكلودوسكيت، وميتاتوربيرنيت، وجاميت (gummite).



شكل ٥-٢: صورة لمنجم رينجير ١ (نظام الحفرة المفتوحة Open pit).

منجم راديوم هيل Radium Hill

تصاحب تمعدنات اليورانيوم بمنجم راديوم هيل، الكسور المنتشرة بالطرف الجنوبي لطية إقليمية محدبة، بصخور النايس من عمر ماقبل الكمبري. يتداخل في هذه الصخور جيلين من الصخور النارية القاعدية، والأبليت الصودي، والبيجماتيت. يمثل معدن الديفيديت الخام الرئيسي، ويصاحبه الروتيل، والإليمنيت، والهيماتيت، والبيوتيت، والكوارتز. يعتقد أن هذه المعادن قد تكونت في المرحلة المتأخرة التي تتبع بتكون الأبليت الصودي.



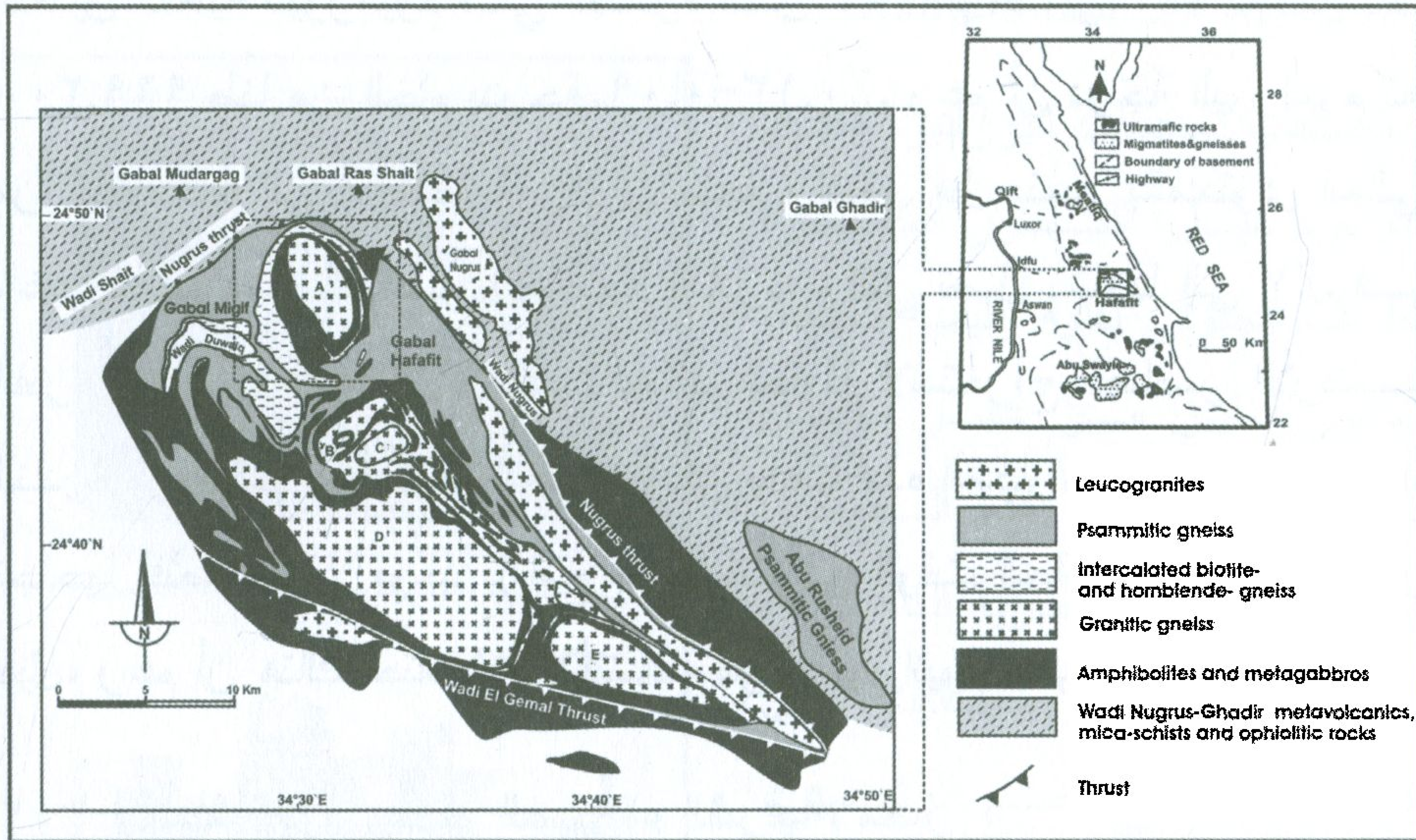
شكل ٥-٣: (أ) صورة لعمال المناجم بمنجم راديوم هيل. (ب) محطة معالجة الخام. (ج) قاطرة نقل الخام بالمنجم.
http://www.sea-us.org.au/oldmines/ radiumhill.html

في الفترة من ١٩٠٦ إلى ١٩٣٠م، تم استغلال منجم راديوم هيل في استخراج الراديوم، وبروميد الراديوم (شكل ٥-٣)، ولكن مع حلول عام ١٩٣٢م، أصبح هذا الإنتاج غير اقتصادي. أُستخدم الراديوم الناتج للأغراض الطبية، بينما استخدم اليورانيوم المصاحب له في صناعة الصبغة الصفراء اللامعة، والتي تدخل في صناعة الزجاج والسيراميك. بدأت عمليات

التعدين الفعلية لليورانيوم في الفترة من ١٩٥٤م حتى ١٩٦١م، بإنتاج ٩٦٩,٣٠٠ طنًا من الخام بدرجة ٠,٠٩-٠,١٣٪. رغم أن درجة اليورانيوم تعد من المتوسطة إلى المنخفضة، إلا أن منجم راديوم هيل يتميز بالمحتوى العالي، وغير العادي من العناصر الأرضية النادرة، والتي تصل نسبتها إلى ٧٪. في الفترة من ١٩٦٩-١٩٨٠م، كانت هناك محاولة لاستخراج العناصر الأرضية النادرة من ركام (tailings) المنجم، ولكن باءت هذه المحاولات بالفشل، لعدم نجاحها اقتصادياً. لا يوجد برامج استكشاف في الوقت الحالي لمنجم راديوم هيل، رغم أن هناك احتمالات لاكتشاف مواقع يورانيوم جديدة.

٢-٢- منطقة أبو روشيد، الصحراء الشرقية، مصر

تقع منطقة أبو روشيد في الجنوب الشرقي لمعقد حفافيت المتحول بالصحراء الشرقية، مصر (شكل ٥-٤). تتمثل الوحدات الصخرية الرئيسية بهذه المنطقة في الصخور الرسوبية المتحولة، صخور الأوفيوليت، أمفيبوليت، ميتاجابرو، نايس الهورنبلند، نايس بساميتي، وليكوجرانيت. تعرض النايس البساميتي بمنطقة وادي أبو روشيد، إلى عمليات تصدع وتهشم أدت إلى تكّون صخور المايلونيت (mylonite) والبريشيا (شكل ٥-٥). في عام ١٩٧٩م، قام كل من عبد المنعم وهارلي بتحديد عمر صخور النايس البساميتي باستخدام طريقة اليورانيوم/الرصاص لحبيبات زركون مفصولة من تلك الصخور، وتم تفسير العمر الناتج (١٧٧٠ مليون سنة) على أنه عمر الصخور الأصلية، التي تكونت منها الرسوبيات، التي أعطت فيما بعد صخور النايس البساميتي. تعرضت صخور النايس البساميتي إلى عمليات تغاير متعددة، مثل الألبتة (albitization) ، السلكتة (silicification)، تكوّن المعادن الطينية (kaolinitization)، وتكوّن معادن الحديد (hematitization)، وتكوّن معادن الكلوريت (chloritization) .



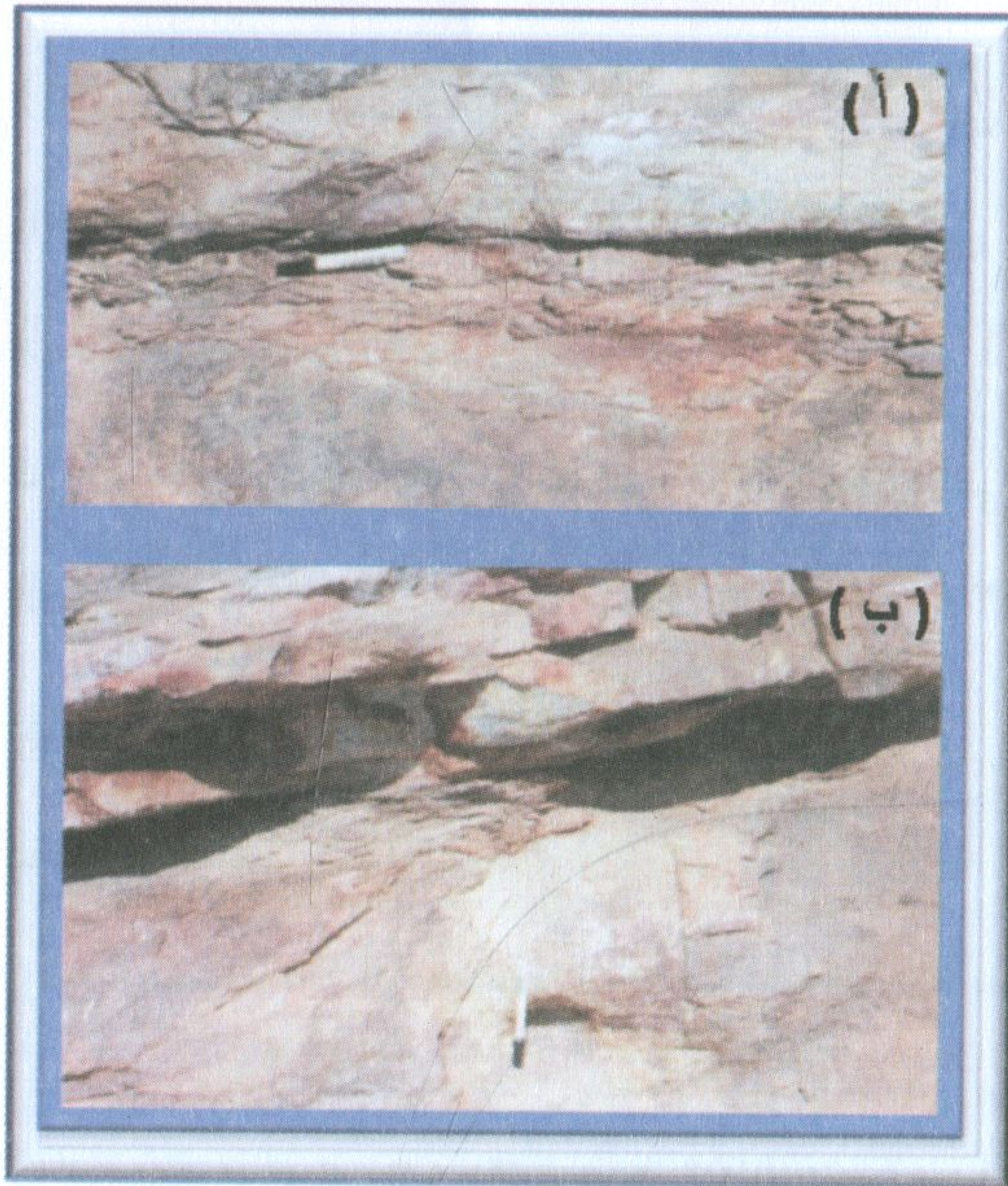
شكل ٥-٤: خريطة جيولوجية لمنطقة حفافيت تبين موقع صخور النايس البساميتي لأبو روشيد (الرملي وآخرون ١٩٩٣).

صُنّفت صخور النايس البساميتي إلى أربعة أقسام، اعتماداً على التركيب المعدني، وعلى مدى تأثير عمليات التحول السائلي (metasomatism) (حسان ١٩٧٣ Hassan). يتمثل الجزء الأول الأعلى للتتابع الصخري في صخور النايس البساميتي الحاوي على الأمازونيت (-amazonite bearing)، والذي يعكس أشد درجة تحوال سائلي، وبه أيضاً العديد من الشاذات الإشعاعية. تم التعرف على معدن اليورانوفان بهذا النوع من الصخور (Abe El-Naby and Frisch, 2006)، بالإضافة إلى معادن أخرى، مثل



شكل ٥-٥: بريشيا بنطاقات القص بمنطقة أبو روشيد-الصحراء الشرقية-مصر.

الزركون، والفلوريت، والكولمبيت، والكبريتيدات، والمونازيت، واليورانوثوريت، والماجنيتيت. يوجد الفلوريت على شكل حبيبات عديمة الأوجه، حول بلورات الكوارتز، والفلسبار، مما يعكس مدى حركية عالية للفلورين، أثناء عملية التحوال السائلي (Hassan, 1973). يكثر بهذه الصخور عروق الكوارتز صغيرة الحجم والبيجماتيت. دلت الدراسات الجيوكيميائية على أن أصل صخور النايس البساميتي يرجع إلى صخور رسوبية مكونة من الأركوز والأرينيت (arenite) (Abe El-Naby and Frisch, 2006) في حوض ترسيبي على حافة قارية نشطة (active continental margin).



شكل ٥-٦: التغاير الحديدي وما يصاحبه من يورانيوم بأسطح التطبق ونطق القص بصخور النايس البساميتي لمنطقة أبو روشيد.

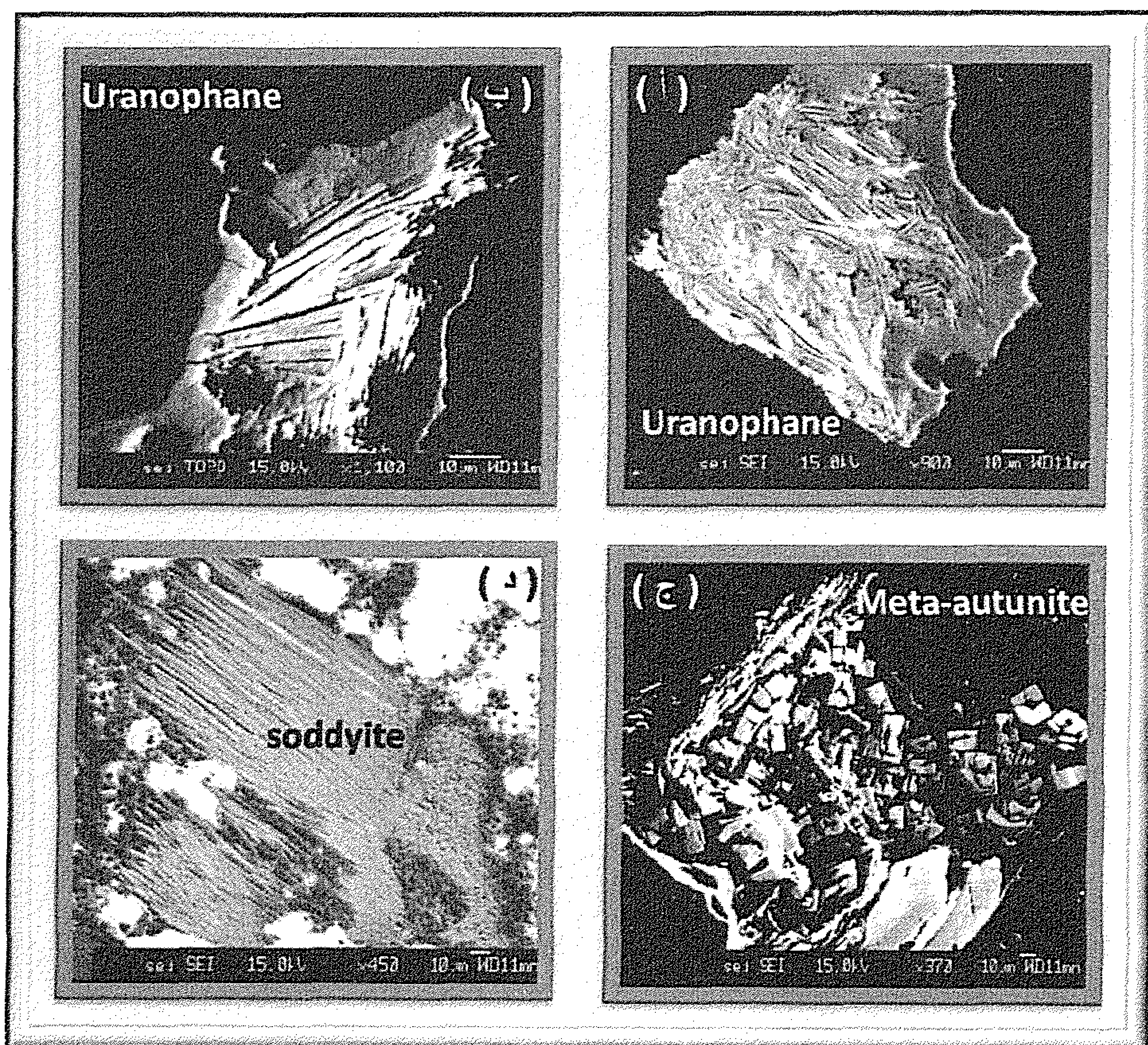
توجد تمعدنات اليورانيوم بالجزء العلوي من النايس البساميتي، خلال نطق القص والتصدع، والكسور، والتي يكثر بها عمليات التغاير الطيني، والحديدي (شكل ٥- ٦). لم يتم التعرف على معادن اليورانيوم الأولية، ربما نتيجة تغايرها أثناء عمليات التحول، ولكن هناك الكثير من معادن اليورانيوم الثانوية، التي تم التعرف عليها، مثل اليورانوفان، البولتووديت، الميتا-أوتونيت والصوديت (شكل ٥-٧)، بالإضافة إلى معدن غير معروف غني بالعناصر الأرضية النادرة. توجد هذه المعادن كقشرة صفراء، وبلورات إبريّة في التجاويف، والكسور،

ومناطق القص بصخور النايس البساميتي. اعتبر حسان (Hassan, 1973) أن معدن الثوريت الغني باليورانيوم، هو مصدر تمعدنات اليورانيوم السطحية بصخور النايس البساميتي بمنطقة أبو روشيد، بالإضافة إلى الزركون ذو البنية المحطمة، والكولمبيت، الذين يمكن أن يشاركا كمصدر لليورانيوم. تم استبعاد الصخور الجرانيتية، والرسوبية المتحولة بمنطقة أبو روشيد كمصدر لتمعدنات اليورانيوم بصخور النايس، نظراً لمحتواهما المنخفض من اليورانيوم، يصل متوسط اليورانيوم بصخور الجرانيت ١,٥ جزء في المليون، وبالصخور الرسوبية المتحولة ٢ جزء في المليون (Abe El-Naby and Frisch, 2006، وMoghazi *et al.,* 2004). دلت دراسات المسح الطيفي الأرضي لأشعة جاما (gamma-ray spectrometric) أن مكافئ اليورانيوم (eU) بصخور النايس المتحول، تتراوح بين ٢ و٤٠٠ جزء في المليون، بمتوسط ٦٢ جزء في المليون، بينما تتراوح قراءات الثوريوم المكافئ (eTh) بين ٥ و ٣٢٠٠ جزء في المليون، بمتوسط قدره ٢١٠ جزء في المليون. تتراوح نسبة مكافئ اليورانيوم إلى الثوريوم (eU/eTh) بين ٠,٠١٢ و ٣,٢، بمتوسط قدره ٠,٣٨، بينما تتراوح نسبة مكافئ اليورانيوم إلى البوتاسيوم (eU/K) بين ٠,١٥ و ٨٠ بمتوسط قدره ١٣,٠٤.

٣- رواسب اليورانيوم التحوالية Metasomatic Uranium Deposits

تتميز هذه الرواسب بتواجد اليورانيوم على شكل منبثات (disseminated) بصخور متأثرة بعمليات تحوال قلوي (alkali-metasomatism). تتمثل معادن الخام الرئيسية في اليورانينيت، وأكاسيد اليورانيوم، والثوريوم. هناك نوعان من هذه الرواسب: ١) تلك التي يسود بها عمليات الألبتة (albitization)، وما يصاحبها من عمليات نزع للكوارتز (desilicification)، وإحلال للألبيت محل

الفلسبار البوتاسي، والفلسبار الغني بالكالسيوم، ٢) الأخرى التي يسود فيها التغاير الطيني (argillization) للفلسبار، وتكّون أكاسيد الحديد (hematization) (Collet, 1981).

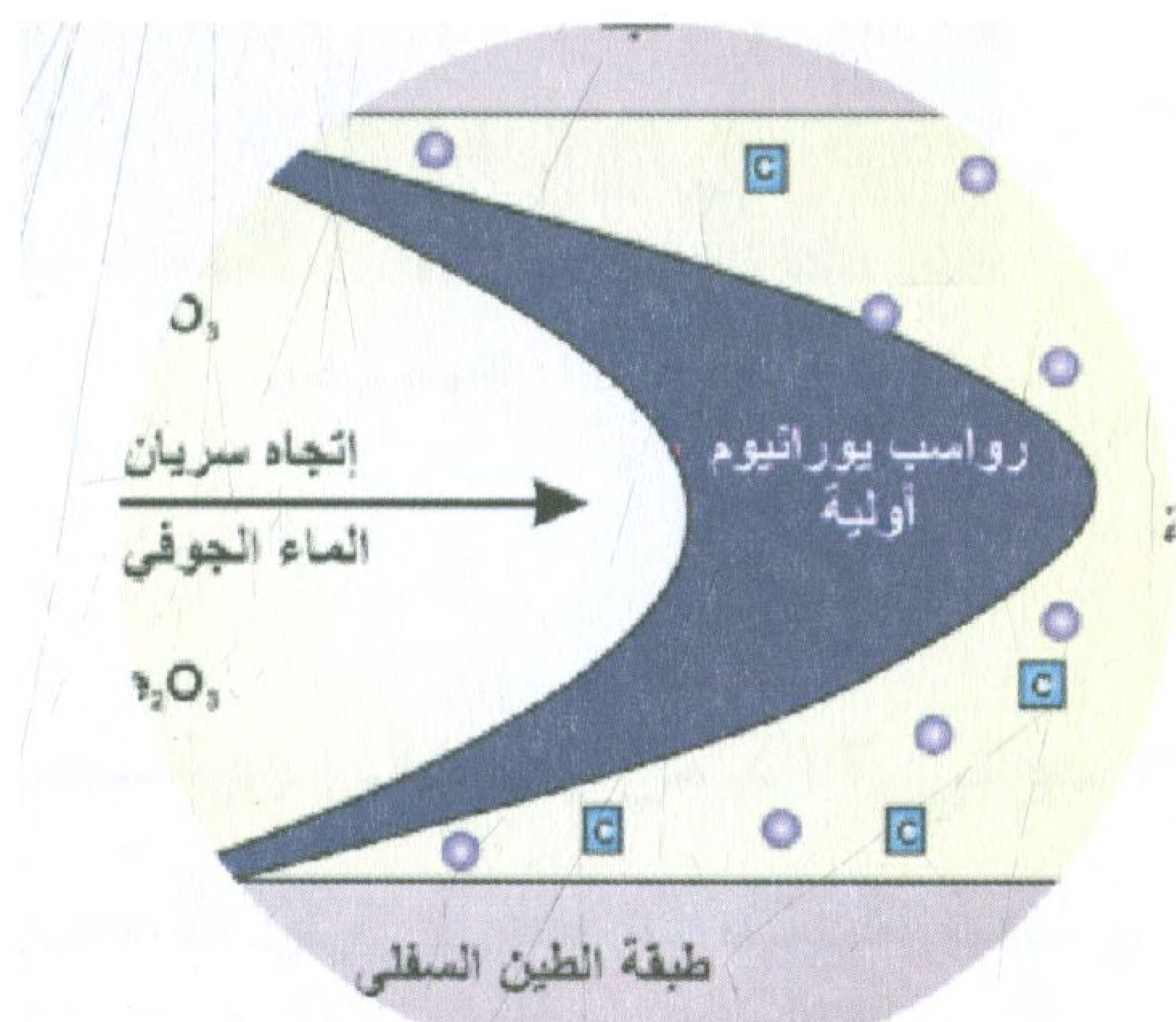


شكل ٥-٧: صور بالمسبار الإلكتروني لتمعدنات اليورانيوم الثانوية بصخور النايس بمنطقة أبو روشيد. (أ، ب) يورانوفان، (ج) ميتا-أتونيت، (د) صودييت (Dawood, 2010).

من أمثلة هذه الرواسب في منطقة روس أدامس (Ross Adams) بالولايات المتحدة الأمريكية: اليورانينيت، واليورانوثوريانيت (uranothorianite)، واليورانوثوريت (uranothorite)، والثوريت، مع بعض من البرانيريت (brannerite)، والكوفينيت (Collet, 1981).

الباب السادس
رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور الرسوبية

- مقدمة
- رواسب اليورانيوم المصاحبة لكنجلميرات حبيبات الكوارتز
- رواسب اليورانيوم المصاحبة لعدم التوافق
- رواسب اليورانيوم المصاحبة للحجر الرملى
- رواسب اليورانيوم المصاحبة للعروق
- رواسب معقد البيرشيا
- رواسب يورانيوم اللجنيت
- رواسب اليورانيوم السطحية
- رواسب اليورانيوم المصاحبة للفوسفات
- رواسب اليورانيوم المصاحبة للطفله السوداء



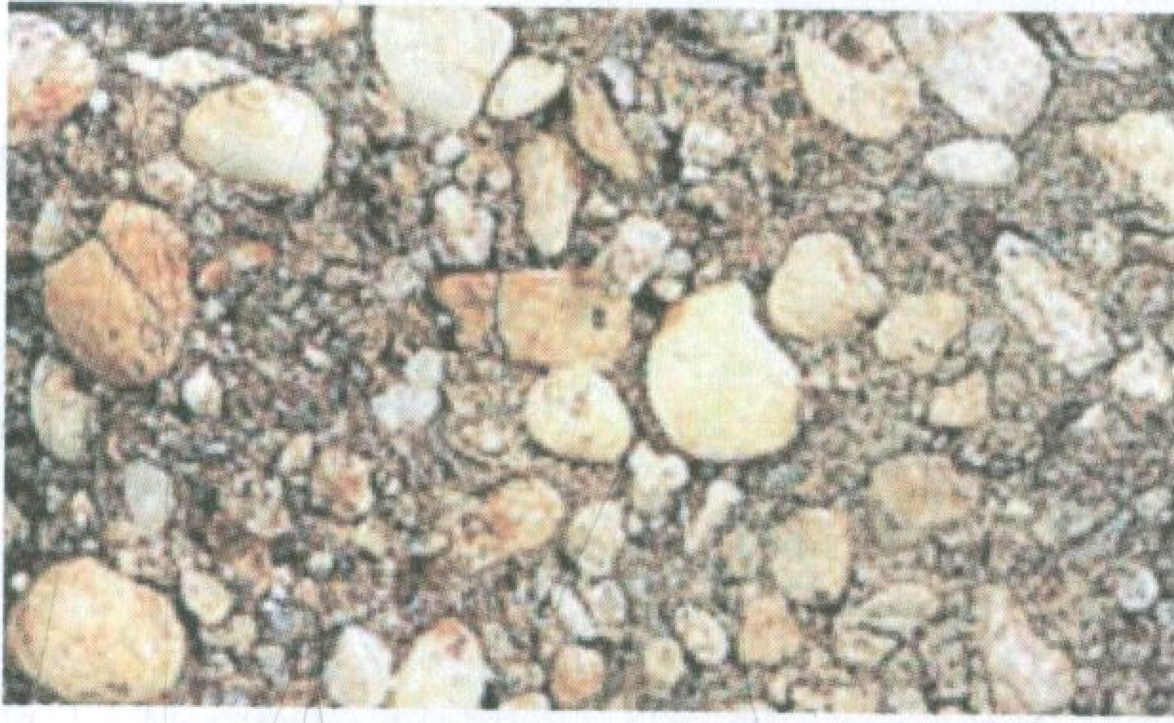
١ – مقدمة

يعتمد المحتوى الإشعاعي للصخور الرسوبية على نوعية الرواسب المترسبة، وعلى ظروف الترسيب، مثل درجة الحامضية وجهد الأكسدة والاختزال. يرجع معظم اليورانيوم، وما يصاحبه من عناصر أخرى بالصخور الرسوبية، إلى عمليات التجوية، حيث يأتي اليورانيوم من تجوية الصخور النارية الحاوية على المعادن المشعة، مثل: اليورانينيت، والكوفينيت، والبرانيريت، ومعادن اليورانيوم الأخرى. تلعب المعادن الطينية، ومعادن الفوسفات، والمواد الكربونية، دورًا هامًا في استقطاب اليورانيوم الذائب في المحاليل، واحتوائه في بنياتها البلورية، أو تكوين معادن جديدة على أسطحها.

٢ – رواسب اليورانيوم المصاحبة لكنجلميرات حبيبات الكوارتز

Quartz-Pebble Conglomerate Uranium Deposits

الكنجلميرات عبارة عن صخر رسوبي يتكون من حبيبات كوارتز كبيرة ومستديرة ملتصقة مع بعضها من خلال مادة لاحمة، قد تكون هذه المادة اللاحمة أكاسيد حديد، أوسيليكا، أو مادة جيرية (شكل ٦–١)، حيث يتم استقطاب اليورانيوم داخل هذه البنية.



شكل ٦–١: كنجلميرات.

تمثل رواسب اليورانيوم من هذا النوع حوالي ١٣٪ من إجمالي رواسب اليورانيوم العالمية، ينحصر معظمها في رواسب طبقات البروتيروزوي الأسفل،

والذي يعلو صخور القاعدة من عصر الأركيـــان (Archean). مـــن المنـــاطق المعروفة باحتوائها علـــى هـــذه الرواســـب، منطقـــة حـــوض وتواترزرانـــد (Witwatersrand basin)، بجنوب أفريقيا، وإليـــوت ليـــك Elliot) lake) بولايـــة أونتاريو بكندا. تتميز المنطقتان بالكم الكبير من الخام منخفض الدرجة ٠,٠١٣-٠,١١ ٪ U_3O_8، (Dalkamp, 1993).

٢-١- رواسب اليورانيوم بحوض وتواترزراند Witwatersrand

يرجع اسم منطقة وتواترزراند بجنوب أفريقيا، إلى وجود العديد من مساقط المياه بهذه المنطقة، والتي تعنـــي "مرتفـــع الميـــاه البيـــضاء Ridge of White Waters". تشتهر منطقة وتواترزراند بكثرة مناجم الذهب بها، والتي تمثل نصف إنتاج الذهب، التي تم بالفعل استخراجه من طبقة الكونجلميرات، التي اكتـــشفت عام ١٨٨٦م. يأتي اليورانيوم كأهم منـــتج جـــانبي (by-product) مـــع عمليـــة استخلاص الذهب. يتمثل التتابع الرسوبي لحوض وتواترزرانـــد فـــي قـــسمين أساسيين، القسم الأسفل وهي مجموعة ويست راند (West Rand Group)، والتي تتكون من رواسب بحرية غنية بالطفلة، أما القسم العلوي فيتكون من رواســـب نهرية لمجموعة سنترال راند (Central Rand Group)، الغنية بالحجر الرملـــي، والكونجلميرات (شكل ٦-٢). يصل سمك المجموعتين حوالي ٧ كم، ويرجـــع عمرهما إلى حوالي ٢٧٠٠ مليون سنة، حيث أدت التصدعات المنتشرة بالمنطقة إلى نشاط بركاني كثيف، غطى التتابع الرسوبي لحوض وتواترزراند. حافظ هذا الغطاء البركاني على تمعدنات الذهب واليورانيوم من عوامل التجوية والتعرية. يتموضع التتابع الرسوبي لحوض وتواترزراند، على صـــخور القاعـــدة لقبـــة جرانيتات جوهانيسبيرج، والتي تتكون من صخور النايس الجرانيتـــي (٣١٠٠-٣٥٠٠ مليون سنة)، والأمفيبوليت، والسربينتينيت.

ترجع نشأة رواسب اليورانيوم بمناجم وتواترزراند، إلـــى عمليـــة انتقـــال وترسيب لليورانينيت، والبيتشبلند، وما يصاحبه من فتـــات منقـــول، ومعـــادن كبريتيدات، وزرنيخات، في بيئة مختزلة (anoxic). قد يحدث نوع من التحـــوير المتزامن (syn-diagenetic)، وإعادة الحركة لليورانيوم من اليورانينيت، يتبعهـــا عملية ادمصاص لليورانيوم (adsorption) بواسطة المواد العـــضوية. تتـــراوح نسبة اليورانيوم إلـــى الثوريـــوم برواســـب وتواترزرانـــد بـــين ٧,١ و ١٩,٦ (Simpson and Bowles, 1977). هنـــاك تفـــسيران لنـــشأة رواســـب الـــذهب واليورانيوم بحوض ويتوترسراند، أحدهما يعتبر هذه الرواسب على أنها منقولة (placer)، والآخر يفسرها على أنها نتاج فعل المحاليل الحرمائية. يعضد التفسير الأول، العلاقة الحميمة بين توزيع التمعدنات، والصفات الرســـوبية بالمنـــاجم، وأيضاً حجم التمعدنات، ووجود معادن ثقيلـــة بـــصخور الكـــونجلميرات مثـــل اليورانينيت.



شكل ٦-٢: صخور الكنجلميرات بحوض ويوترزراند، جنوب أفريقيا.
http://web.uct.ac.za/depts/geolsci/dlr/hons1999/index.html

٢-٢- رواسب اليورانيوم بمنطقة إليوت ليك Elliot Lake

توجد رواسب اليورانيوم بطبقات كونجلميرات الكوارتز بمنطقة إليوت ليك بولاية أنتاريو بكندا (شكل ٦-٣). يصل سمك هذه الطبقات حوالي ٢ م، ويرجع عمرها إلى ٢٣٠٠ مليون سنة. تتمثل معادن اليورانيوم في اليورانينيت، والبرانيريت، والمونازيت، واليورانوثوريت (Mock and Ohmoto, 1998). قد يشير وجود مثل هذه الصحبة المعدنية إلى نشأة هذه المعادن، من جراء فعل المحاليل الحرمائية، أثناء عمليات التحاور (diagenesis) والتحول. يؤكد ذلك العمر المحدد لليورانينيت والبرانيريت (١٧٠٠ مليون سنة)، أي، لاحقًا لعمليات الترسيب. وعلى الجانب الآخر، فإن المحتوى العالي من الثوريوم باليورانينيت، يدل على نشأة من رواسب منقولة. علاوة على ذلك، فإن وجود حبيبات من



شكل ٦-٣: طبقة من كنجلميرات الكوارتز الغنية بمعادن اليورانيوم والبيريت بسطح عدم التوافق بين صخور النايس الجرانيتي من عمر الأركيان ومكون ماتينيندا (Matinenda) بمنطقة إليوت ليك (Mock and Ohmoto, 1998).

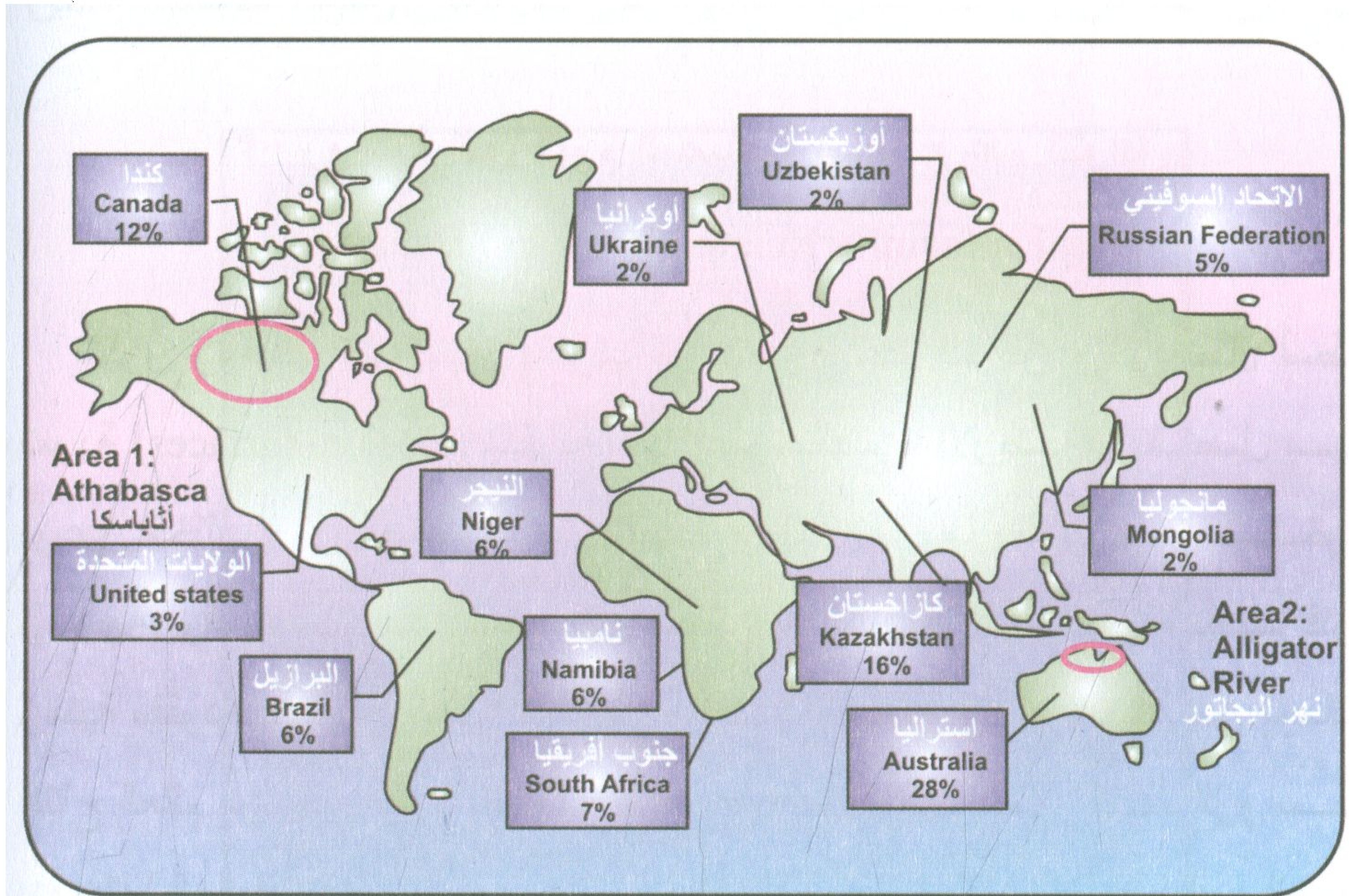
اليورانينيت المنقول بصخور كونجلميرات الكوارتز بمنطقة إليوت ليك، يدل على بيئة اختزالية قديمة، ترجع لعمر البروتيروزوي المبكر (Holland, 1984). يرجع ذلك إلى أن كلاً من اليورانينيت، وما يصاحبه من بيريت، هي معادن غير مستقرة تحت ظروف غلاف جوي غني بالأكسجين. ورغم ذلك فقد قدم بارنيكوت وآخرون (Barnicoat *et al.*, 1997) أدلة، على أن اليورانينيت والبيريت ليسا من أصل رواسب منقولة، وبالتالي، فإن وجودهما لا يشير بالضرورة إلى بيئة اختزالية قديمة، كما كان معروفاً من قبل. تصل كمية الخام بمنطقة إليوت ليك– بليند ريفر (Elliot Lake–Blind River) بكندا إلى ٦٠٠٠– ١٨٠,٠٠٠ طن أكسيد اليورانيوم U_3O_8، بمتوسط درجة خام ٠,١٥٪ U_3O_8 (Mckay and Miezitis, 2001).

٣– رواسب اليورانيوم المصاحبة لسطوح عدم التوافق

Unconformity Related Uranium Deposits

تتكون رواسب اليورانيوم بالقرب من سطوح عدم التوافق والتي تمثل أسطح تعرية (erosion surfaces) مدفونة على عمق بالقشرة الأرضية، وتفصل بين نوعين مختلفين من الصخور، مثل الصخور النارية، وما يعلوها من صخور رسوبية، وقد يفصل هذا السطح بين طبقتين من الصخور الرسوبية، بينهما فترة زمنية مفقودة. تمثل رواسب اليورانيوم المصاحبة لعدم التوافق ٣٣٪ من إجمالي إنتاج العالم من اليورانيوم (Lambert *et al.*, 1996)، كما تتميز هذه الرواسب بدرجتها العالية من أكسيد اليورانيوم U_3O_8. ومن أمثلة رواسب اليورانيوم المصاحبة لعدم التوافق من حيث أهميتها العالمية، هي تلك التي تقع بحوض أثاباسكا (Athabasca Basin) بكندا، ورواسب اليورانيوم بمنطقة شرق نهر أليجاتور (East Alligator River)، والتي تقع بحوض ماك آرثر (Mc Arthur)

بالمقاطعات الشمالية من استراليا (شكل ٦-٤). توجد هذه الرواسب بالقرب من عدم التوافق بين صخور القاعدة المتحولة من عمر البروتيروزوي الأسفل، وما يعلوها من صخور الحجر الرملي من عمر البروتيروزوي الأوسط. تم تفسير نشأة هذه الرواسب وكذلك التي بحوض أثاباسكا بكندا، على أنها نتاج عملية تدوير (circulation) واسعة النطاق لمحاليل حارة (brines) مختلطة مع محاليل اختزالية (reducing fluid) (Wilde *et al.*, 1989، Fuzikawa, 1980، Hoeve and Sibbald, 1978، Pagel *et al.*, 1980، Fayek and Kysers, 1997، و Kyser *et al.*, 2000).



شكل ٦-٤: خريطة تبين مناطق تواجد أهم رواسب اليورانيوم .

البيانات عن: **BGR: Reserves, Resources and Availability of Energy**

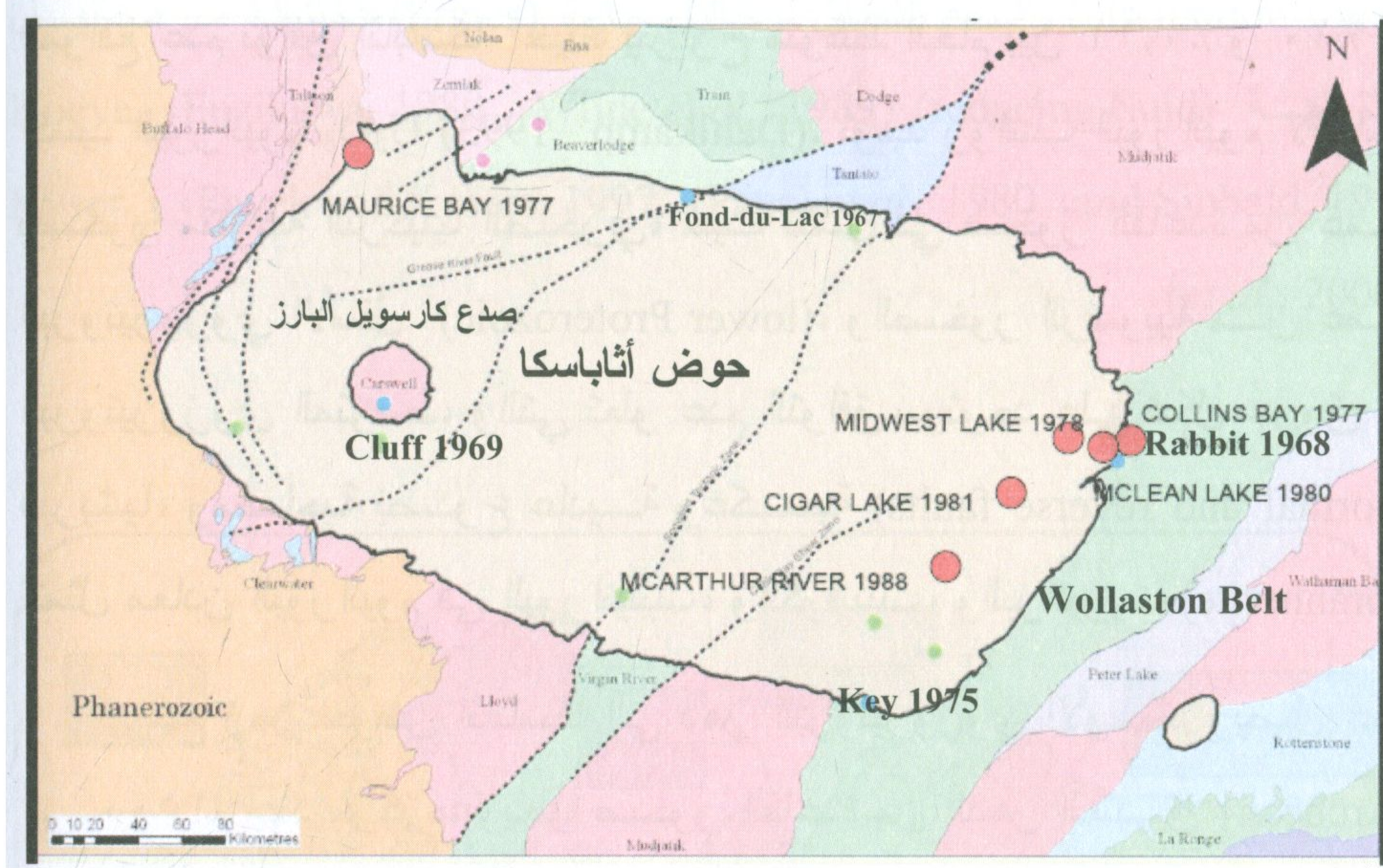
٣-١- رواسب يورانيوم حوض أثاباسكا Athabasca Basin

يضم حوض أثاباسكا العديد من الأمثلة، مثل: سيجارليك (Cigar lake)، كي ليك (Key lake)، رابيت ليك (Rabbit lake) في شرق الحوض، وكلاف ليك (Cluff lake) في غرب الحوض. تصاحب رواسب اليورانيوم في كل هذه المواقع عدم توافق أثاباسكا حيث يتراوح متوسط الخام بين ٠,١١٪ و ٢٠٪ من أكسيد اليورانيوم U_3O_8 (Dahlkamp, 1993). توجد رواسب اليورانيوم لأثاباسكا بصخور متنوعة التركيب الصخري، حيث تتمثل في صخور القاعدة من عمر البروتيروزوي الأسفل (lower Proterozoic)، والصخور الرسوبية من عمر البروتيروزوي المتوسط، والتي تعلو عدم التوافق، وتوجد على شكل عروق من البريشيا، ومصاحبة بصدوع عادية وعكسية (normal and reverse faults). تتمثل معادن اليورانيوم في اليورانينيت، والكوفينيت، والبرانيريت (brannerite).

يرجع زمن حوض أثاباسكا إلى دهر البروتيروزوي الأوسط، ويصل عمقه إلى ١٥٠٠م عند مركزه، ويعلو صخور القاعدة من الدهر العتيق (Archean). من أهم الظواهر الجيولوجية التي تميز حوض أثاباسكا، هو وجود صدع بارز يسمى كارسويل (Carswell horst)، أدى هذا الصدع إلى رفع صخور القاعدة إلى سطح الأرض، بداخل الحوض (شكل ٦-٥). يوجد ناحية الشرق من حوض أثاباسكا حزام ولاستون (Wollaston belt)، المكون من صخور رسوبية متحولة، ويعلو هذا الحوض رواسب اليورانيوم المتميزة.

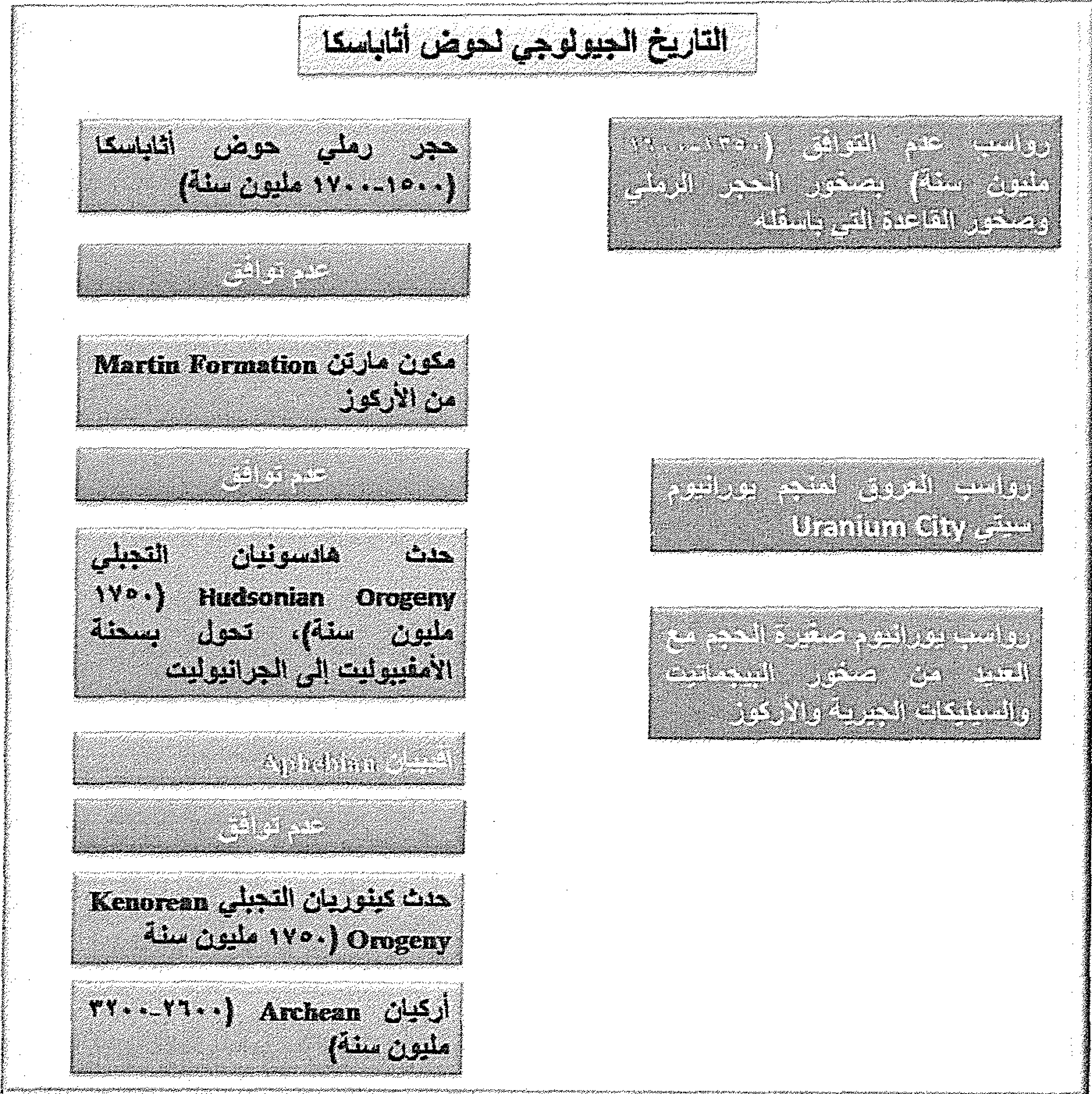
يوضح شكل (٦-٦) الوضع الجيولوجي لحوض أثاباسكا، وما يصاحبه من رواسب يورانيوم. يبين الشكل أن هناك ثلاثة أنواع من الرواسب. يمثل النوع الأول، رواسب عدم التوافق (١٣٥٠-١٦٠٠ مليون سنة)، والتي يرتبط فيها وجود اليورانيوم بصخور الحجر الرملي وصخور القاعدة التي بأسفله.

ويصاحب النوع الثاني من تلك الرواسب، العروق التي بصخور القاعــدة مثــل منجم يورانيوم سيتي (uranium city). أما النوع الثالث من رواسب اليورانيوم، فإنه يعد من النوع صغير الحجم، وهو يرتبط بصخور البيجماتيت، والــسيليكات الجيرية، والأركوز.



شكل ٦-٥: خريطة تبين حدود حوض أثاباسكا وعلاقته بصدع كارسويل البارز وأيضاً بحزام ولاستون من ناحية الشرق. كما يوضح الشكل مواقع المناجم وتاريخ اكتشافها بحوض أثاباسكا .
(From: www.esouramium.com)

مرت عمليات الاستكشاف بحوض أثاباسكا بمراحل عديــدة، تتميــز كــل مرحلة بأفكار جديدة، وتبنّي نماذج مختلفة لطرق ترسيب اليورانيوم، وصـــاحب كل مرحلة اكتشاف عدد من المناجم. بدء استكشاف اليورانيوم بحوض أثاباســكا في الخمسينات مع تبنّي نموذج العرق (vein model)، والذي ساعد على اكتشاف منجم يورانيوم سيتي، حيث أُستخرج منه حوالي ٦٥ مليون رطل من اليورانيوم المصاحب لعروق بصخور القاعدة. في الفترة من الستينات إلى السبعينات، تبنّت عمليات الاستكشاف نموذج الرول فرونت (roll front model)، والــذي ســاعد



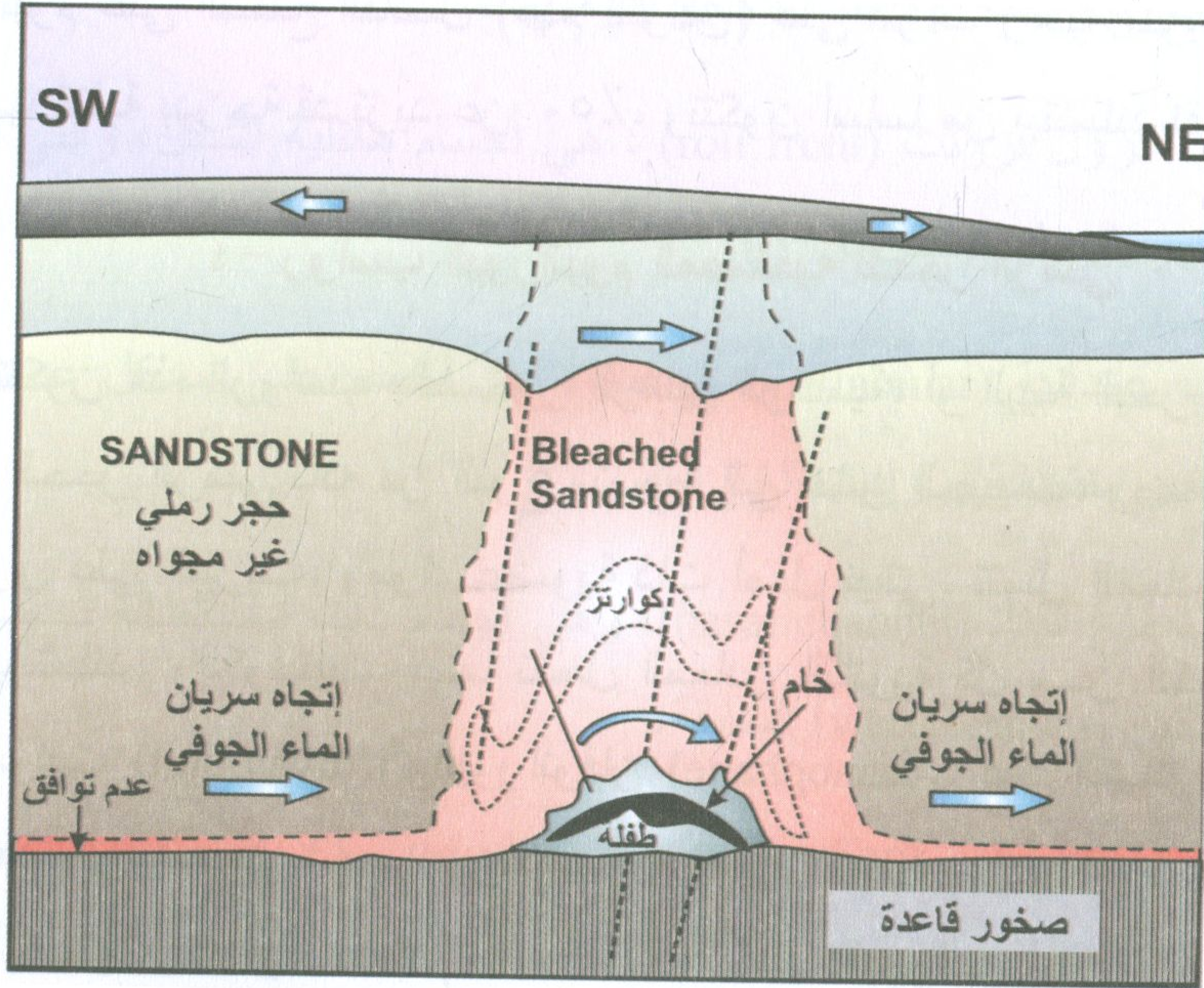
شكل ٦-٦: التاريخ الجيولوجي لحوض أثاباسكا، وما يصاحبه من الأنواع المختلفة لرواسب اليورانيوم.

على اكتشاف العديد من المناجم بحوض أثاباسكا مثل منجم رابيت ليك (Rabbit Lake)، ومنجم كلاف ليك (Cluff Lake)، ومنجم فوند-دو-لاس (Fond-du-Lac)، وأخيراً منجم كاي ليك (Key Lake) (انظر شكل ٦-٥). رغم أن اكتشاف هذه المناجم مبني على نموذج الرول فرونت، إلا أن كلاً منهم يمثل قاعدة الانطلاق لاكتشاف رواسب اليورانيوم المصاحبة لعدم التوافق بحوض أثاباسكا. في الفترة من ١٩٧٥ إلى ١٩٩٠م وبناءً على نموذج عدم التوافق (unconformity model)، فقد تم اكتشاف مناجم ميدويست ليك (Midwest

Lake)، ودون ليك (Dawn Lake)، ومكليان ليك (McLean Lake)، وكولينس باي (Collins Bay)، وإيجيل بوينت (Eagle Point) وأخيراً سيجار ليك (Cigar Lake) وماك آرثر ريفير (McArthur River) (انظر شكل ٦-٥).

بدأت عملية الاستكشاف عام ١٩٨٥ بمسح جوي كهربي-مغنطيسي (electro-magnetic survey)، والذي ساعد على تحديد حدود الصخور الطينية الجرافيتية المتحولة، تبعها مسح أرضي كهربي-مغنطيسي، ثم عمليات حفر. أُجري بعد ذلك العديد من الدراسات الجيوكيميائية، لتحديد هالات التغاير (alteration halos)، والتي ساعدت إلى حد كبير في اكتشاف على الأقل، أحد الرواسب الهامة (راسب ميلينيوم Millenium).

يمثل منجم سيجار ليك أشهر تواجدات اليورانيوم المصاحب لسطح عدم التوافق، حيث يحتوى الخام على متوسط ٢٠٪ من أكسيد اليورانيوم، وقد يصل في بعض المناطق إلى ٥٠٪ ، كما يمثل خام سيجار ليك ٢٥٪ من إجمالي إنتاج اليورانيوم العالمي، حتى غُمر بالمياه الجوفية. يتكون منجم سيجار ليك من حوالي ٤٠٠ متر من الحجر الرملي، يعلوه غطاء من الجليد. تبلغ أبعاد الخام ١٠-١٠٠م اتساع، و٢ كم طولاً مصاحباً لعدم التوافق، الذي يعلو صخور طينية جرافيتية متحولة (graphitic metapelite). يوجد العديد من الصدوع والكسور بصخور الحجر الرملي، حيث يحاط الراسب بنطاق من التغاير الطيني، يقل في شدته كلما اتجهنا إلى أعلى، يتبعه نطاق من الكوارتز الحاوي على تجاويف (vuggy)، والحجر الرملي ذو المسامية العالية (شكل ٦-٧). يعلو الراسب حتى السطح، هالات جيوكيميائية مميزة، وعروق رفيعة من البيتشبلند.



شكل ٦-٧: تواجدات اليورانيوم المصاحب لعدم التوافق بمنطقة سيجار ليك بكندا.
(From Cramer and Smellei 1994)

هناك نوعان من رواسب اليورانيوم بمنجم سيجار ليك: ١) رواسب مصاحبة للحجر الرملي، وهي غنية باليورانيوم، وفلزات أخرى مثل: النيكل، والنحاس، والكوبالت، والزرنيخ، مع محتوى عالي من العناصر الأرضية النادرة. ترتبط هذه الرواسب بنطق القص (shear zones)، والتصدع، وهالات التغاير، بالحجر الرملي. ٢) رواسب تصاحب صخور القاعدة، أسفل عدم التوافق، عند عمق ٣٠٠-٤٠٠ مترًا، وهي ضعيفة في محتوى اليورانيوم في بعض الأحيان (مثل منجم ميلينيوم). نتجت هذه الرواسب عن محاليل سطحية مؤكسدة هابطة إلى أسفل، مارةً بصخور الحجر الرملي، حاملة اليورانيوم معها، أو من محاليل مختزلة صاعدة من الوشاح، من خلال تراكيب جيولوجية كبيرة الحجم. يترسب

اليورانيوم على السطح الفاصل (عدم التوافق) على فترات زمنية طويلة، مكوناً رواسب كتلية بدرجة قد تزيد عن ٥٠٪، وتتكون أساساً من بيتشبلند نقي.

٤- رواسب اليورانيوم المصاحبة للحجر الرملي

تتكون هذه الرواسب بالصخور الرملية الركامية، أو البيئة البحرية الضحلة. يتميز الحجر الرملي بأنه من النوع متوسط إلى خشن الحبيبات، وضعيف الفرز، ويحتوى على البيريت، ومواد عضوية ذات أصل نباتي. تتمثل المعادن الأولية في البيتشبلند، والكوفينيت، بينما تشمل المعادن الثانوية كل من الكارنوتيت، والتيامونيت (tuyamunit)، واليورانوفان (uranophane). على المستوى العالمي، تمثل هذه الرواسب ١٨٪ من رواسب اليورانيوم (Finch, 1996). رغم انخفاض درجة خامتها (ore grade) (٠,٠٥-٠,٤٪ أكسيد اليورانيوم U_3O_8)، يمكن أن يحتوى الراسب الواحد على ما يزيد عن ٥٠٠٠ طن يورانيوم U_3O_8، وقد تصل الكمية بحوض الترسيب ككل، إلى العديد من مئات الألاف من الأطنان (Dahlkamp, 1993).

توجد مثل هذه الرواسب بالولايات المتحدة الأمريكية، وكازاخستان، والنيجر، والجابون، ومناطق أخرى. يعتقد أن رواسب اليورانيوم بالحجر الرملي بمنطقة رول فرونت (roll front) بجبال الروكي، ناتجة عن انتقال اليورانيوم بالمياه الجوفية إلى أسفل خزان مياه محصور (confined aquifer)، حيث يتم ترسيب اليورانيوم تحت ظروف اختزالية معينة (شكل ٦-٨). عادةً، يرجع مصدر اليورانيوم إلى صخور نارية (جرانيت أو رماد بركاني)، إما قريبه من، أو متبادله مع، أو تعلو صخور الحجر الرملي الحاوي على تمعدنات اليورانيوم. تتكون التمعدنات عندما تحمل المحاليل المؤكسدة اليورانيوم إلى الحجر الرملي، حيث يتم ترسبه تحت ظروف الاختزال بسبب وجود مادة عضوية أو كبريتيدات أو غاز الميثان.

هناك أربع أنواع رئيسة لرواسب الحجر الرملي:

رواسب الرول فرونت (roll front) : هي أجسام هلاليّة الشّكل، والّتي تقطع صخور الحجر الرملي (شكل ٦-٨).

رواسب عمدانية (tabular)، وهي عبارة عن أجسام على شكل عدسات مستطيلة وغير منتظمة برواسب اختزالية.

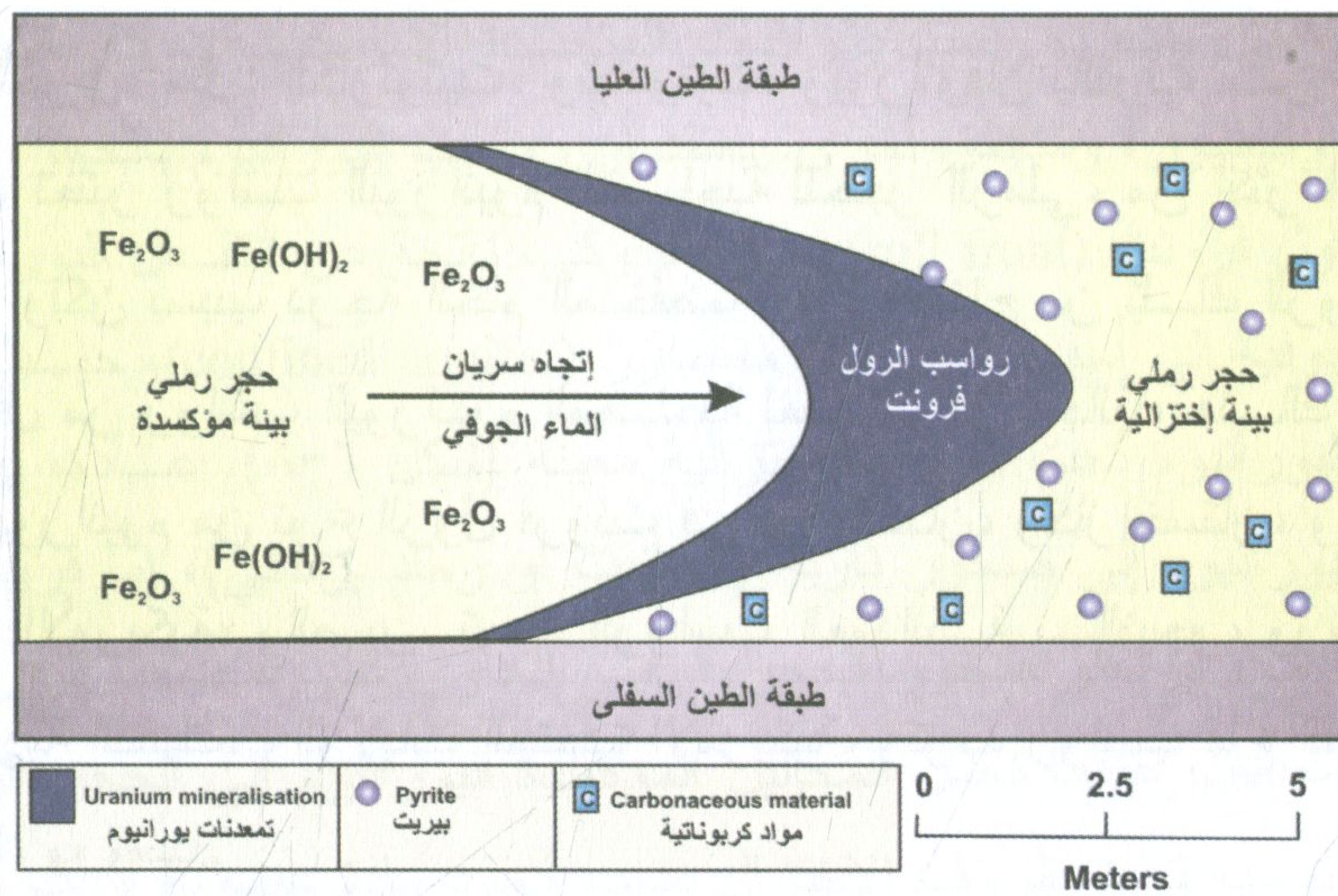
رواسب قاع القناة (basal channel)، وهي أجسام ذات استطالة تصاحب الجداول المائية (watercourses) السابقة.

رواسب تكتونية/ صخرية (tectonic/lithologic) وهي مجاورة لنطق التصدعات ذات النفاذية العالية.

يمكن أن تكون الصخور الرملية الحاوية على التمعدنات من أعمار مختلفة' تتراوح بوجهٍ عام، قيم اليورانيوم في المدى ٤٠٠ - ٤٠٠٠ جزء في المليون. عادةً، يحتوي الجزء المتأكسد من الخام على يورانينيت أو كوفينيت، ولكن توجد معادن أخرى، مثل: الكارنوتيت، وتيامونيت، ويورانوفان بالقرب من الرول فرونت. تعتبر رواسب اليورانيوم المصاحبة للحجر الرملي، من أكثر الرواسب شيوعاً، ولكن بسبب درجة الخام المنخفضة، فإن الإنتاج من تلك الرواسب، يكون أقل من رواسب اليورانيوم المصاحبة لعدم التوافق. حاليًا، هناك مناجم إنتاج لليورانيوم من نوع الرول فرونت في أوزبكستان، وكازاخستان، والولايات المتحدة الأمريكية، والصين. توجد الرواسب العمدانية بالنيجر، ورومانيا، وجمهوريّة التشيك، والولايات المتحدة الأمريكية، وتوجد رواسب قاع القناه في استراليا، وروسيا.

٤-١- نشأة اليورانيوم برواسب الحجر الرملي

تعتبر رواسب اليورانيوم من النوع الرول فرونت، من أفضل الأمثلة لترسيب اليورانيوم بصخور الحجر الرملي. تتكون هذه الرواسب من حجر رملي عالي النفاذية، متبادل طبقياً مع طبقات أخرى أقل نفاذية. تأخذ هذه الرواسب شكلاً هلالياً (شكل ٦-٨)، حيث تلعب القدرة الاختزالية لخزان المياه دوراً كبيراً في تكوين هذه الرواسب. تنتقل المياه المحملة باليورانيوم السداسي في صورة أيون اليورانيل (UO_2^{2+})، أو في صورة معقدات الكربونات إلى أسفل منسوب الماء الجوفي، حيث البيئة الاختزالية. يؤدي ذلك إلى اختزال اليورانيوم السداسي، إلى اليورانيوم الرباعي، والذي يترسب بدوره على صورة معدن اليورانينيت أو البيتشبلند. ترجع عملية الاختزال هذه إلى وجود المواد العضوية، والبيريت، والمركزيت، أو كبريتيد الهيدروجين. ينتقل الأخير بسهولة، وبالتالي يمكن أن يهاجر لمسافات بعيدة مع المياه الجوفية. من الأمثلة على ذلك، رواسب رول فرونت بتكساس، حيث تمثل رواسب الزيت والغاز أسفل الطبقة الحاوية على خام اليورانيوم، مصدراً لكبريتيد الهيدروجين (Adler, 1974).



شكل ٦- ٨: مخطط يوضح طريقة نشأة رواسب اليورانيوم من نوع الرول (roll-type deposits).

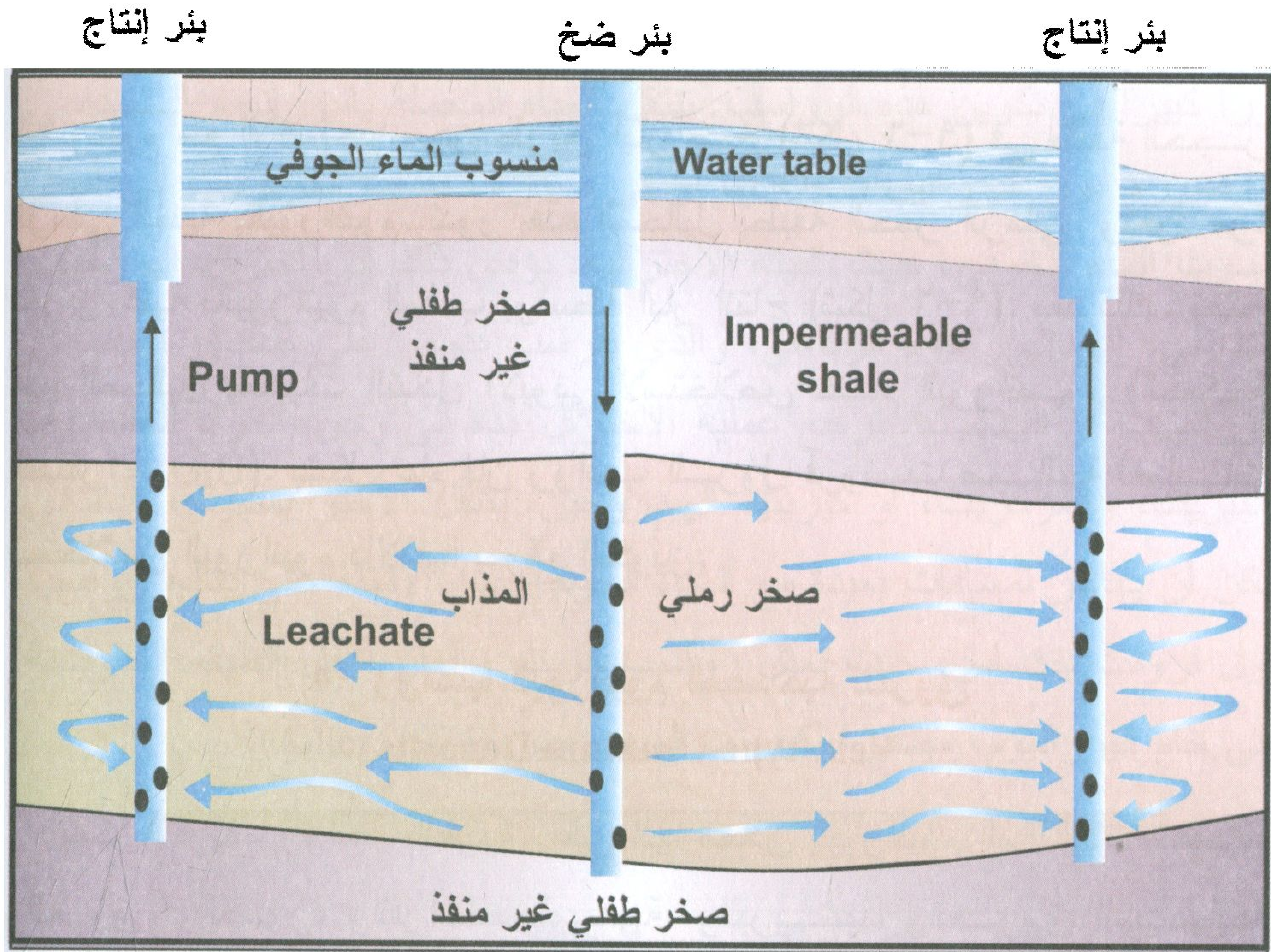
٤-٢- استخلاص اليورانيوم بالإذابة بموقع التعدين In-Situ Leaching

لو أن طبقة الحجر الرملي الغنية باليورانيوم محصورة بين طبقتين من الحجر الطيني أو الطفلة (انظر شكل ٦-٨)، مع وجود خزان مائي، يمكن في هذه الحالة استخلاص اليورانيوم بالإذابة بموقع التعدين. تستلزم عملية الذوبان موادًا كيميائية معينة وبسيطة نسبياً. على سبيل المثال، تُحْقَن بيكربونات الصوديوم مع الأكسيجين، عن طريق آبار ضخ (شكل ٦-٩) في طبقة الحجر الرملي الغنية باليورانيوم. تدور هذه المحاليل بطبقة الحجر الرملي وتعود مرة أخرى غنية باليورانيوم المذاب بواسطة آبار إنتاج (شكل ٦-٩). بعد ذلك، تعالج هذه المحاليل بعمليات التبادل الأيوني لاستخلاص خام اليورانيوم (الكعكة الصّفراء U_3O_8). بشكل عام فإن رواسب الرول فرونت صالحة لعمليات استخلاص اليورانيوم بالإذابة بموقع التكوين.

٥- رواسب اليورانيوم المصاحبة للعروق
Vein-type Uranium Deposits

يمكن تعريف رواسب العروق على أنها معادن اليورانيوم المالئة للتشققات، والعروق، والكسور، والفراغات المسامية، والبريشيا، والعروق المتشابكة (stockwork) المصاحبة للصدوع شديدة الميل. تتمثل المعادن الأولية في البيتشبلند، والكوفينيت، والبرانيريت بعروق الكوارتز، والكربونات. كما يوجد العديد من الفلزات الأخرى بتركيزات اقتصادية، مثل: البزموث (Bi)، والكوبالت (Co)، والنيكل (Ni)، والزرنيخ (As)، والفضة (Ag)، والنحاس (Cu)، والموليبدنم (Mo). غالبًا ما توجد رواسب اليورانيوم بالعروق بكميات قليلة (أقل من ١٠٠٠٠٠ طن)، ودرجة خام منخفضة (٠,١٥- ٠,٢٥ أكسيد اليورانيوم)، ورغم ذلك، فإن هناك بعض الرواسب التي توجد بكميات كبيرة بأوروبا، والولايات المتحدة الأمريكية، واستراليا. كان هذا النوع من الرواسب سائداً

للإنتاج العالمي لليورانيوم، حتى اكتشاف رواسب اليورانيوم المصاحبة لأسـطح عدم التوافق في أوائل الستينات. كما يوجد العديد من رواسب العروق مصاحبة للصخور الرسوبية، على سبيل المثال منطقة منجم شينكولوبوي (Shinkolobwe mine) بجمهورية الكونغو الديمقراطية.



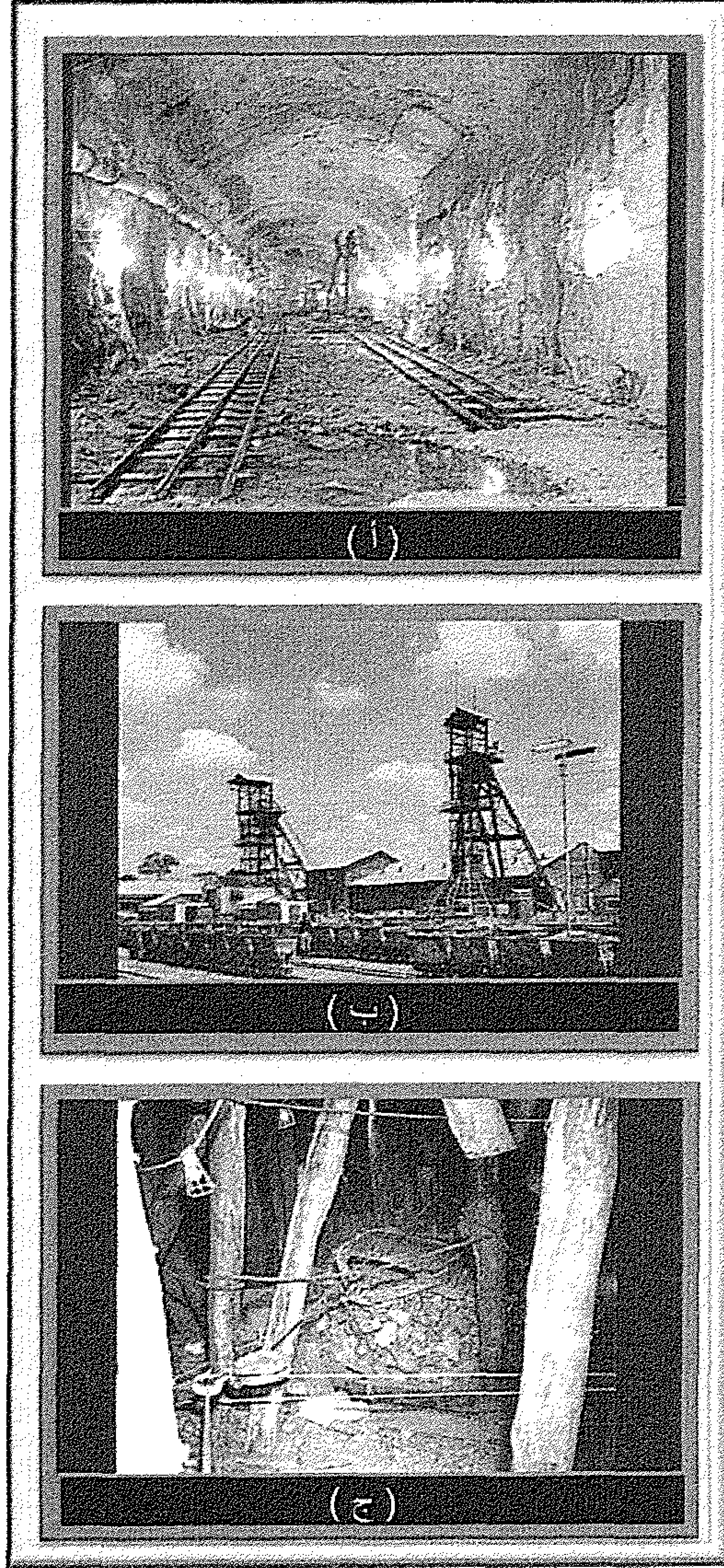
شكل ٦-٩: رواسب اليورانيوم المصاحبة للحجر الرملي بمنطقة رول فرونت (roll front) بجبال الروكي. توجد طبقة الحجر الرملي بين طبقتين غير منفذتين من الصخور الطفلية بينما تساعد نفاذية الحجر الرملي على استخلاص اليورانيوم منه من خلال عدة آبار للحقن، وأخرى للأنتاج.

٥-١- منجم شينكولوبوي، الكونغو Shinkolobwe, Kongo

يرجع اسم شينكولوبوي إلى بلدة في إقلـيم كاتانجـا، بجمهوريـة الكونغـو الديمقراطية، الواقعة بالقرب من بلدة ليكاسي (Likasi)، وتقريبًا على بعـد ١٢٠ ميلاً تجاه الشمال الغربي لبمباشي (Lubumbashi). استخدمت الولايات المتحـدة

موارد يورانيوم شينكولوبوي لصناعة القنبلة الذرية التي ألقتها علي هيروشيما (حوالي ١٢٠٠ طنًّا من خام اليورانيوم منذ عام ١٩٣٩م، حسب ما ورد عن موسوعة ويكيبيديا). توجد عروق اليورانيوم بصخور الدولوميت السيليكاتى، والطفلة الدولوميتية، والكربوناتية. تحتوى التمعدنات على النحاس، والكوبالت، والرصاص، والزنك، والحديد، في صورة أكاسيد، وساليينيدات، وكبريتيدات، ويصاحبها اليورانيتيت، ومعادن اليورانيوم الثانوية الأخرى. تصل درجة أكسيد اليورانيوم إلى ٠,٠٨٥٪ (Plant *et al.*, 1999). تكونت هذه الرواسب من نشاط محاليل حرمائية بداخل الحوض الترسيبي (intrabasinal fluids) ناتجة عن حدث تكتوني إقليمي (Plant *et al.*, 1999).

يرجع تاريخ منجم شينكولوبوي إلى عام ١٩١٥م حيث تم اكتشافه. أُغلِقَ هذا المنجم في عام ١٩٦٠م، عندما منحت بلجيكا الاستقلال للكونغو، حيث سد المسئولون البلجيكيّون ممرّ منجم اليورانيوم الرئيسي بالخرسانة. منذ أوائل الثمانينات، تم استغلال المنجم في استخراج النحاس، ومعه الكوبالت كمنتج جانبي. قد بلغ معدّل إنتاج الكوبالت السنوي حوالي عشرة ألاف طن. في عام ١٩٩٩م حاولت جمهورية الكونغو الديمقراطية فتح المنجم مجدداً لإنتاج اليورانيوم بمساعدة كوريا الشمالية. لكن التلوث الإشعاعي الذي أصاب منطقة شينكولوبوي من جراء عمليات التعدين القديمة، جعلت من الصعوبة لأي شخص العمل هناك. انهار المنجم في عام ٢٠٠٤م، مما أدى إلى وفاة ثمانية من عمال المناجم، وإصابة أكثر من ثلاثة عشر شخصاً. يرجع ذلك إلى التّعدين غير المنظّم من ناحية الأمان الإشعاعي، وإدارة المخلّفات الإشعاعيّة (شكل ٦-١٠). أدى انهيار المنجم إلى تعرض المنطقة لجرعات زّائدة من الإشعاع ، كما أدت عمليات نقل الخام ومعالجتة بطريقة مخالفة لأنظمة الأمان النووي، الواردة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية، إلى التلوث الإشعاعي في المناطق البعيدة عن موقع المنجم.

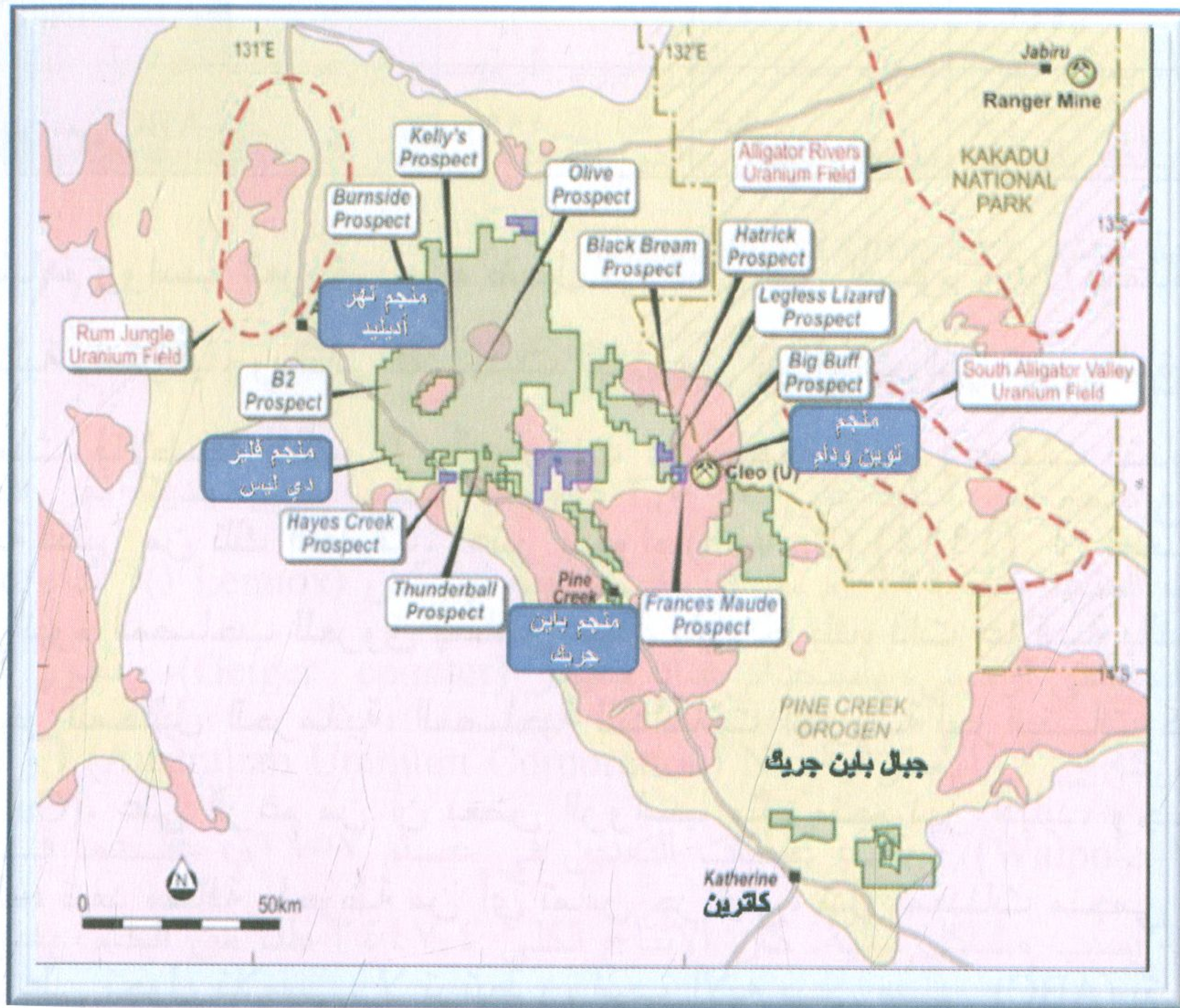


شكل ٦-١٠: صور قديمة لمنجم شينكولوبوي. (أ) صورة لممر المنجم قبل ملئه بالخرسانة المسلحة. (ب) صورة لعربات نقل الخام. (ج) الدعامات السيئة التي أدت إلى إنهيار المنجم عام ٢٠٠٤.

٥-٢- رواسب عروق اليورانيوم بالمقاطعة الشمالية، استراليا

يوجد العديد من رواسب اليورانيوم المصاحبه للعروق، في مناطق عديدة بالمقاطعة الشمالية باستراليا (Northern Territory). من هذه المناطق: منطقة

جبال باين جريك (Pine Greek Orogen)، ومنجم نهر أديليد (Adelaide River Mine)، ومنجم جورج كريك (George Creek)، ومنجم فلير دي ليس (Fleur de Lys)، ومنجم توين ودام (Twin and Dam)، ومنجم الأيه بـــي ســـي (ABC)، ومنطقة نهر إديث (Edith River) (شكل ٦-١١). معظم هذه المناجم، باســتثناء منجم توين ودام (Twin and Dam)، اُكتُشِفت أثناء المرحلة الأولى لاستكــشاف اليورانيوم في أوائل الخمسينيّات. كانت مناجم نهر أديليد، جورج جريك وفليــر دي، ليس بين بعض مناجم اليورانيوم التي شهدت عمليات تعــدين بالمقاطعــة الشّماليّة، لكنّ، كانت هذه المناجم غير كبيرة بالقدر الكافي، لجذب اهتمام كبير، مما يعكس ضآلة المعلومات الجيولوجيّة المتاحة لهذه المناجم. يوضح الجــدول (٦-١) كمية الخام ودرجته بهذه المناجم.



شكل ٦-١١: خريطة تبين مواقع مناجم عروق اليورانيوم بالمقاطعة الشمالية لاستراليا.
(www.thundelarra.com)

جدول ٦-١: كمية ودرجة خام اليورانيوم برواسب العروق بالمقاطعة الشمالية، استراليا (Lally, 2002).

اسم المنجم	كمية الخام (طن)	درجة الخام ($U_3O_8\%$)	كمية أكسيد اليورانيوم في الطن
نهر أديليد Adelaide River	٣٨٦١	٠,٥	١٩,٣
جورج كريك George Creek	١١٨	٠,١٢	٠,١
فلير دي ليس Fleur de Lys	١٢٢	٠,٢٢	٠,٣
توين Twin		٠,١١٨٨	٣٠٤,٤
دام Dam		٠,١٢٩	٤٤٢,١
أيه بي سي ABC	١٩٩٠	٠,٢٥	٤,٩

تساهم رواسب العروق بجزء ضئيل في إنتاج اليورانيوم U_3O_8 بالمقاطعة الشمالية باستراليا، وبالتالي فقد جذبت القليل من الدراسات التي تهتم بنشأة هذه الخامات. بالإضافة لذلك، فان المعلومات عن طبيعة الخام وعمليات التغاير غير متاحة لكثير من تلك الخامات. اعتبر باجواه (Bajwah) (١٩٩٤) أن تمعدنات اليورانيوم المصاحب للعروق بمناطق جبال باين جريك، ذات علاقة بالنشاط المتأخر للمحاليل الحرمائية، المصاحبة للتداخلات النارية لجرانيتات كولن (Cullen). على الرغم من أن بعض الرواسب مثل منجم نهر أديليد، وجورج جريك، تبعد مسافة ملحوظة من أيّ تماس جرانيتي، تدل تمعدنات منجمي توين، ودام على تحول تلامسي. لا ترتبط رواسب الأيه بي سي (ABC) بتداخل جرانيتي، حيث أنها تتواجد بصخور بركانية للمجموعة التحتية لكومبولجي (Kombolgie subgroup). اقترح كل من ماك كاي وميزيتيس (McKay and

Miezitis, 2001)، أن الرواسب من نوع العروق في منطقة جبال باين جريبيك (Pine Greek Orogen)، قد تكونت بطريقة مشابهة إلى تلك في رواسب عدم التوافق، عن طريق سوائل مؤكسدة هابطة من طبقة الحجر الرملي، التي تعلوه خلال الصدوع والفواصل.

منطقة جبال باين جريبيك Pine Greek Orogen

يوجد العديد من رواسب اليورانيوم والمناجم الاستكشافية في وسط وجنوب منطقة جبال باين جريبيك، والتي تم تصنيفها على أنها رواسب لعروق اليورانيوم. تختلف هذه الرواسب عن رواسب العروق الأخرى في صغر حجمها. يمثل اليورانينيت معدن اليورانيوم الرئيسي، ويصاحب عروق الكوارتز الغنية بالكبريتيدات بمناطق القص، التي تتقاطع مع التراكيب الجيولوجية، أثناء تجبّل بارامندي (Barramundi Orogeny).

منجم نهر أديليد Adelaide River Mine

يقع منجم نهر أديليد على بعد ٣,٥ كيلومترًا جنوب غرب مدينة نهر أديليد. أُكْتُشِفَ المنجم عام ١٩٥٤م من قبل السيد جيه لينوكس (J Lennox)، أثناء عملية مسح إشعاعي أرضي، باستخدام عداد جايجر (Geiger counter)، وتطور من قبل شركة إن إل الأسترالية (Australian Uranium Corporation) NL (والبول Walpole ١٩٥٧). توقّفت عمليّات التعدين في عام ١٩٥٧م، عندما فشلت الشّركة بسبب مشاكل ماليّة. كان الإنتاج الكلي ٣٤٤٧,٤ طنًا من الخام، بمتوسط درجة ٠,٥٪ أكسيد اليورانيوم U_3O_8. أعيد تقييم الرواسب في الفترة ١٩٥٩-١٩٦٠م (Plumb, 1960)، عن طريق حفر أربعة آبار، وقدرت احتياطيّات الخام المتبقّية بحوالي ٦٣٥٠,٤ طنًا بمعدّل ٠,٣٢٪ أكسيد اليورانيوم U_3O_8 (Fander,

1981). وفي الفترة ١٩٧٩-١٩٨١م، نفّذت دّراسات مغنطيسيّة، وراديومترية، وكهرومغنطيسيّة على المنطقة (Fander, 1981).

تتكون جيولوجية المنطقة من الصخر الطيني المتطبق، جريواك وكونجلميرات لمكون بريل جريك (Burrell Creek Formation)، المطوي إلى سلسلة من الطيات الغاطسة في اتجاه الشمال والجنوب. تقع رواسب اليورانيوم في الجناح الغربي لطيّة مقعّرة، حيث تميل الطبقات بزاوية قدرها ٦٠ درجة في اتجاه ٢٤٠ درجة (Plumb, 1960). تم التعرف على أربعة مناطق للخام، سمّيت بالخامات السوداء، والبنّيّة، والبرتقاليّة، والبيضاء. يعتبر الخام الأسود من أكبر هذه الخامات، والذي يرجع إليه معظم الإنتاج (Walpole, 1957). يوجد البيتشبلند كمنبثات في الصخور المجاورة للصدوع، أو يغطي أسطح الفواصل والكسور المصاحبة لعروق الكوارتز. من المعادن الإضافية المصاحبة: البيريت، والكالكوبيريت، والأرسينوبيريت، والماركزيت، و لينايت (linneite) (Plumb, 1960).

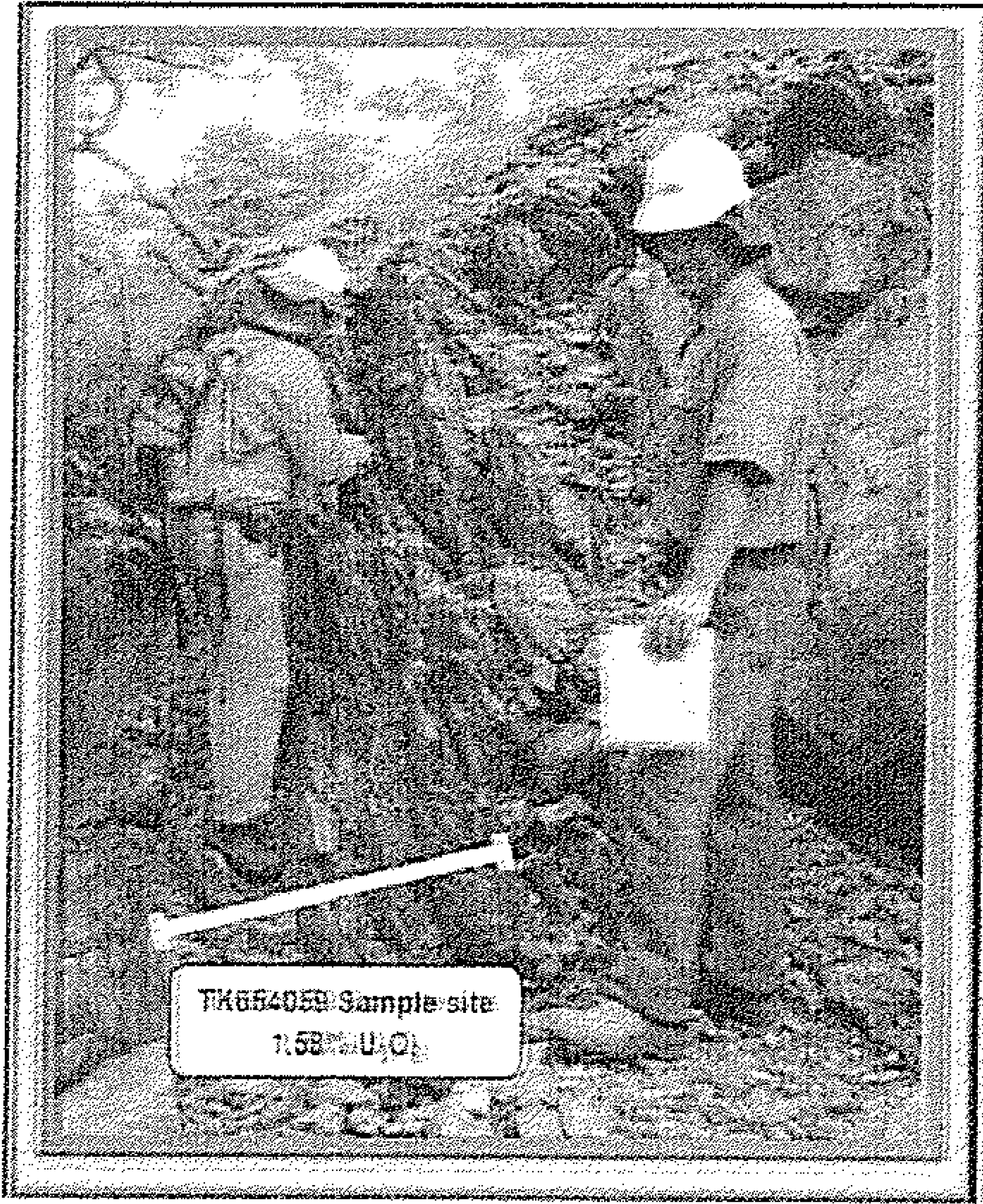
منجم جورج كريك George Creek

اُكتُشِفَ المنجم من قبل الجيولوجيّ جيه ريد (J Rade) في عام ١٩٥٤م، ووضع كخام احتياطيّ. تشبه الجيولوجيا الإقليميّة لمنطقة منجم جورج جريك تلك بمنجم نهر أديليد، باستثناء أنّ الطيات بمكون بريل جريك تكون غاطسة في اتجاه الشمال بدلاً من الجنوب. يقع المنجم في الطرف الغربيّ لطيّة محدّبة غاطسة للشمال. تصاحب التمعدنات الصدوع المتجهة شمال-غرب، وما يصاحبها من كسور. كما هو الحال في منجم نهر أديليد، توجد التمعدنات فقط عند تقاطع الصدع مع طبقات الجريواك ذات الحبيبات الخشنة، والّتي تتبادل طبقياً مع الحجر الطيني الخالي من التمعدنات. تتكوّن الخامة الرّئيسيّة من قشرة

البيتشبلند، التي تغطي الكسور والفواصل المرتبطة بعروق الكوارتز الحاملة للبيريت والكالكوبيريت. توجد معادن التوربيرنيت، والميتا-توربيرنيت، والأوتونيت في منطقة الأكسدة السطحية، والممتدة إلى عمق ٢٥ مترًا.

منجم فلير دي ليس Fleur de Lys

يقع منجم فلير دي ليس على بعد كيلومترين تجاه الشّمال الغربيّ لمنجم ذهب كوزمو هاولي (Cosmo Howley)، واُكْتُشِفَ من قبل السيد ماكدونالد (E Macdonald) في عام ١٩٥٣م، أثناء عملية مسح إشعاعي أرضي بعداد جايجر. تتكون جيولوجية المنطقة من الصخر الغريني، والطيني، والطف البركاني، والفيلايت، والمقطوعة بسدود دوليريت زامو (Zamu dolerite). تعرض هذا التتابع لعمليات طي وتحول (شكل ٦-١٢)، أثناء تجبّل باراموندي (Barramundi Orogeny). تقع تمعدنات النحاس واليورانيوم في مناطق القص والفواصل. تتكوّن الخامة الأولية من اليورانينيت، والبيريت، والأرسينوبيريت، والكالكوبيريت، والبيسموثينيت (bismuthinite)، في العروق الضيّقة، مع كميات متفاوته من الكوارتز والسيريسيت (McAndrew, 1954). بدا البيتشبلند على أنه قد تكوّن بعد البيريت والأرسينوبيريت، لكن قبل الكالكوبيريت والبيسموثينيت (McAndrew, 1954). توجد معادن التوربيرنيت، والملاكيت، والأزوريت



شكل ٦-١٢: صخور طينية وبركانية متحولة بمنطقة فلير دي ليس.
.(www.thundelarra.com)

(azurite)، والكُبرايت (cuprite) كقشور، تغطي مستويات التطبق بمناطق القصّ والفواصل، بنطاق التأكسد (Firman, 1955).

منجم توين ودام Twin and Dam

يقع منجم توين ودام على بعد ٣٦ كم شمال–شمال شرق مدينة باين جريك. تصل تقديرات مجموع احتياطيّ الخامة (المثبتة والمحتملة) ٢٥٦ طنًا بدرجة ٠,١١٨٧٪ U_3O_8، لمنجم توين، و٣٤١ طنًا بدرجة ٠,١٣٪ U_3O_8 لمنجم دام (Berthault and Harrop, 1990). تصاحب التمعدنات صخور الطفلة الكربونيّة والكلوريتية، والصخر الدولوميتي، والتي تتبع مكوّن ماسون (Masson formation). تتحول هذه الصخور إلى الهورنفلس عند خط التماس مع الصخور الجرانيتية المجاورة. تنحصر التمعدنات في الصدوع المتجهة إلى الشمال، والشمال–شمال شرق، والّتي قد تحتوي أيضًا على القواطع الجرانيتيّة أو المافية. تتكون كتل الخام من عروق كثيفة ذات مسافات بينية ضيقة، وغنية باليورانينيت، خلال حواف الصدوع، ومرتبطة بتغايرات كلوريتية، سيريسيتية وهيماتيتية. توجد التمعدنات الثّانوية بنطاق الأكسدة، وتتكوّن من باسيتيت (bassetite)، كوفينيت (coffinite)، وميتا–أوتونيت (meta-autunite).

منجم أيه بي سي ABC

يقع المنجم على بعد ١٧,٥ كيلومترًا تجاه الشمال الشرقي لكاترين (Katherine)، واُكتُشِفَ عام ١٩٥٣م أثناء التخريط الجيولوجي الإقليمي في المنطقة. تم التعرف من خلال التخريط والحفر أثناء الفترة ١٩٥٣–١٩٥٤م، على كمية خام تصل إلى ١٠٧٣ طنًا بدرجة ٠,٤٪ أكسيد اليورانيوم في منطقة

ذات عرض ١٠ أمتار، وطول ١٧ مترًا، و سمك ٣ أمتار (Gardner *et al.*, 1955). تتكون جيولوجية المنطقة من صخور بركانيّة مافية لعضو ماك أدينز جريك (McAddens Creek volcanic Member)، والّذي يقع بين صخور الحجر الرملي لمامادوير (Mamadewerre)، والجماريرنبانج (Gumarrirnbang) بمجموعة نهر كاترين السّفليّة (Katherine River Group). ترتبط التمعدنات بصخور بركانيّة مافية لعضو ماك ادينز جريك، ومرتبطة أيضاً بسلسلة من الصدوع السلّمية (en echelon faults) المتّجهة شمال-شمال شرق، والكسور المتعلّقة بالحركة على الصدع المتجه شمال غرب. تم التعرف على معادن يورانيوم ثانويّة، والتي تضم الأوتونيت، الفوسفرانيليت، والتوربيرنيت والتي توجد على شكل منثورٍ، ومالئة للفجوات (Gardner *et al.*, 1955).

منطقة نهر إديث Edith River Area

تم التعرف على العديد من تواجدات اليورانيوم بالمنطقة الواقعة على جانبيّ سكّة حديد نهر إديث القديمة، على بعد ٤٠ كيلومترًا تجاه الشّمال الغربيّ من مدينة كاترين. اُكْتُشِفَ من قبل فرق التنقيب في عام ١٩٥٢. ترتبط هذه التواجدات المعدنية بنطق القص المتجهة شمال-شمال غرب، بصخور ليكوجرانيت تينيسونز المتجرزنة (greisenised Tennysons leucogranite). يصل اتساع نطق القص إلى ١٠٠ متر، والمملوءه بالكوارتز (Kruse *et al.*, 1994). كشفت عمليات الحفر عن وجود منطقةً صغيرةً عدسية الشكل لخام منخفض الدرجة (أقل من ٠,٠٨٪ أكسيد اليورانيوم، Firman, 1954). ترتبط التمعدنات بالبريشيا الغنية بالأباتيت بنطق القص. يوجد الميتا-أوتونيت كقشور رقيقة على أسطح الكسور.

٦- رواسب معقد البريشيا

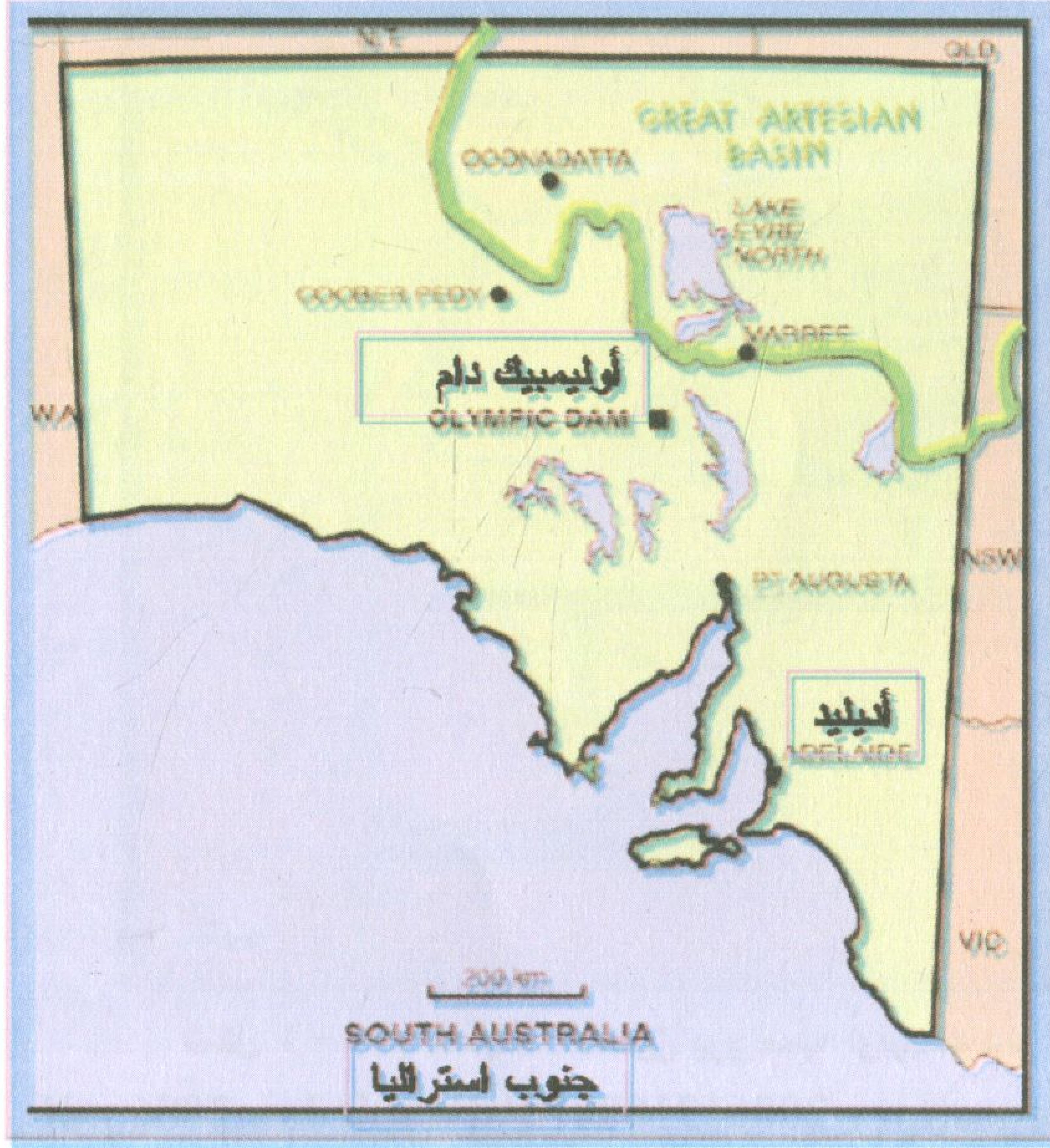
Breccia- Complex Uranium Deposits

يرجع اسم البريشيا إلى الكلمة الإيطاليّة، والتي تعني الصّخر المكوّن من قطع صخرية أو معدنية مفتتة، قد تكون متشابهة أو مختلفة في التّكوين، تلتحم هذه القطع مع بعضها عن طريق مادة لاحمة (cementing material). هناك العديد من أنواع البريشيا، منها البريشيا الرسوبيّة، البريشيا التكتونية، البريشيا البركانيّة، والبريشيا الخاصّة بالمياه الحرمائية. أهمّ رواسب هذا النّوع في العالم هو راسب أوليمبك دام في أستراليا، والذي يمثل حوالي ٦٦٪ من احتياطيّات اليورانيوم في استراليا ومواردها. يصل متوسط درجة اليورانيوم ٠,٠٥٪، ولكنّ يوجد المكون الحاوي على اليورانيوم بكميات كبيرة. توجد الرواسب في الجرانيت الغنيّ بالهيماتيت، والذي يعلوه حوالي ٣٠٠ مترًا لصخور رسوبيّة أفقية. تتم عمليّات التّنقيب تحت الأرض. ومن الأمثلة الأخرى لرواسب يورانيوم البريشيا الهامة، تلك التي بولاية أريزونا بالولايات المتّحدة الأمريكيّة، حيث توجد تمعدنات اليورانيوم في أنابيب البريشيا ذات العلاقة بالبراكين القديمة.

٦-١- رواسب أوليمبك دام Olympic Dam

تقع رواسب أوليمبك دام على بعد ٥٦٠ كيلومترًا شمال أديليد، جنوب استراليا (شكل ٦-١٣). يعتبر راسب أوليمبك دام كتلة من الخام متعدّدة المعادن. كما يعتبر رابع أكبر رواسب للنّحاس المتبقّي، وخامس راسب للذّهب، ومن أكبر رواسب اليورانيوم في العالم. كما يحتوي أيضًا على كمّيّات كبيرة من الفضّة. تضم منطقة أوليمبك دام عددًا كبيرًا من تواجدات خام اليورانيوم المنفصلة، على مساحة عدّة كيلومترات مربّعة، بعمق يتراوح بين ٣٥٠م إلى كيلومتر تقريبًا. اُكتشف خام أوليمبك دام في عام ١٩٧٥م، ودخل في الإنتاج عام

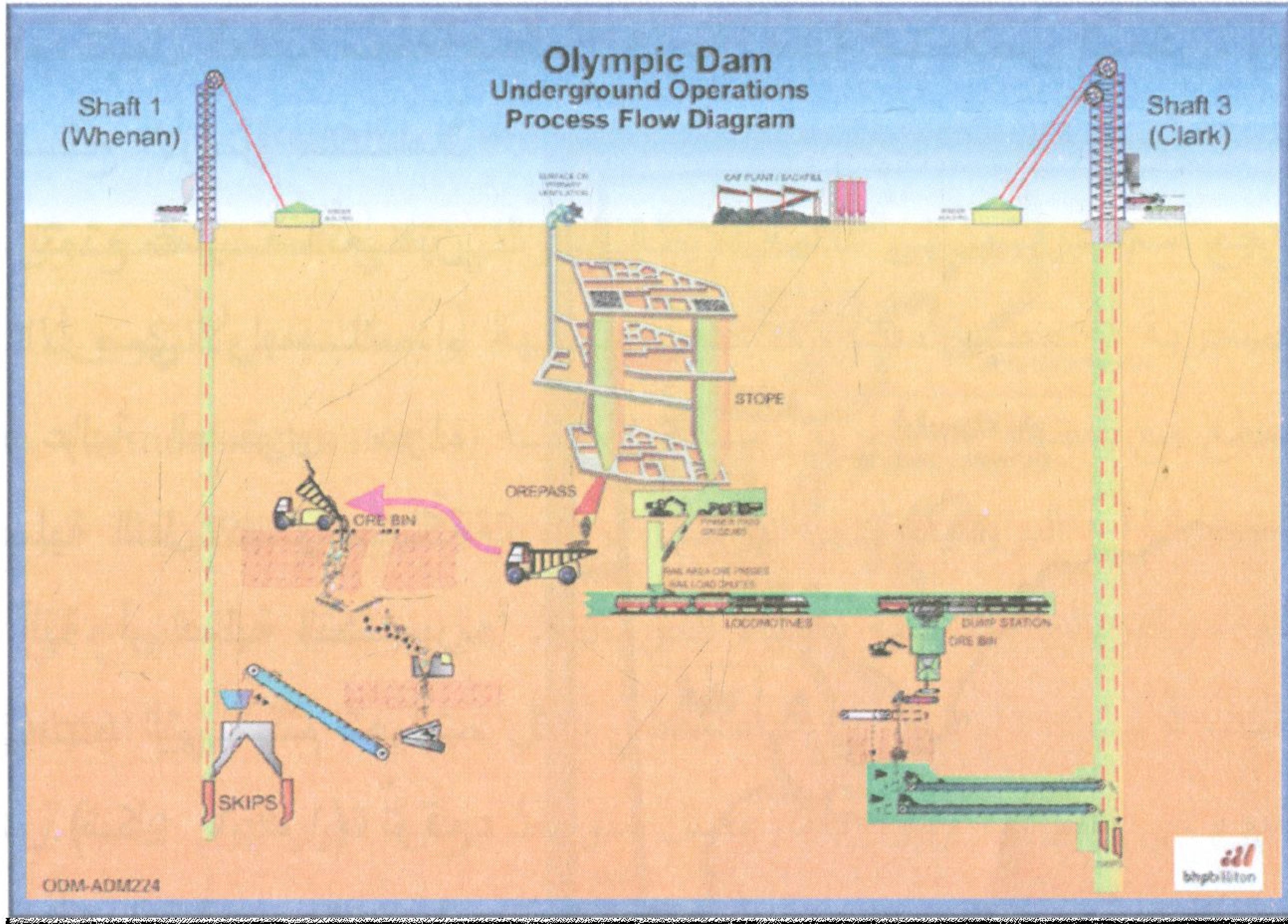
١٩٨٨م. تشمل العمليّة مجمّعًا سطحيًّا خاصًا بعملية استخلاص المعادن، ومنجمًا تحت سطح الأرض متكاملاً تمامًا. تتمتع عملية التّعدين تحت الأرضي لأوليمبك دام بمَيكَنَة عالية المستوى، سواء في عملية النقل عبر سكّة حديد آليّة، أو عملية التكسير (crushing) التي تتم تحت الأرض (شكل ٦-١٤). تُرْفَع الخامة إلى السّطح حيث تصل إلى إحدى دائرتين للطحن. بعد الطحن، يمر النتاج المائع (slurry) في دائرة معالجة



شكل ٦-١٣: خريطة جيولوجية تبين موقع رواسب يورانيوم أوليمبيك دام، استراليا.

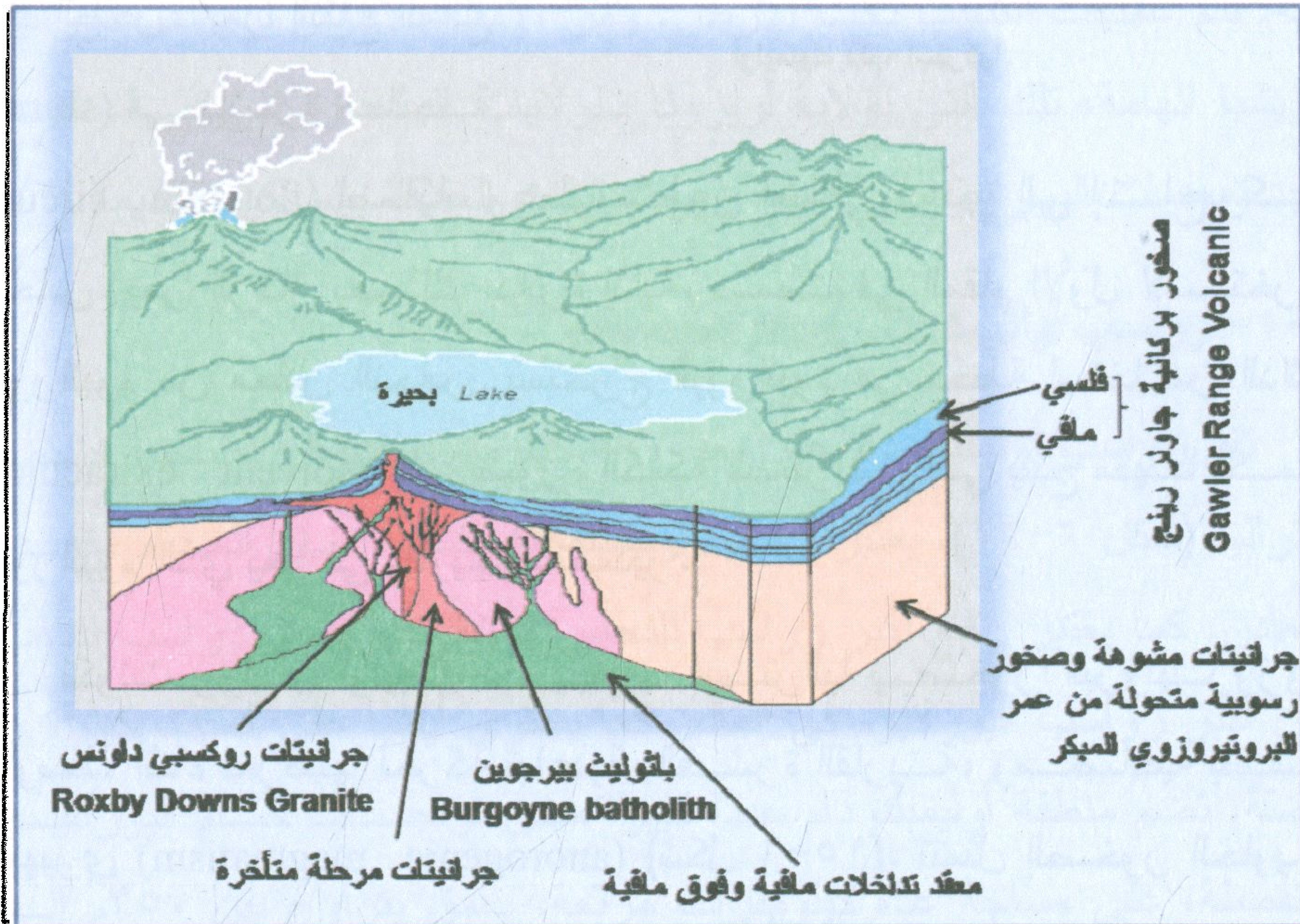
(flotation circuit) إضافيّة، وعمليات طحن إضافي، يؤدّي إلى إنتاج ركاز النحاس. يمرّ الركاز بعد ذلك بدائرة إذابة، صُمِّمَتْ في المقام الأول لاستخراج اليورانيوم من معادن النّحاس. يُسْتَخْرَج اليورانيوم في محطّة استخلاص الذائب (solvent extraction) على صورة الكعكة الصّفراء، والّتي ينتج منها أكسيد اليورانيوم الذي يعبأ في حاويات للتّصدير.

تكونت رواسب أوليبمك دام بجنوب استراليا بصخور البروتيروزوي الأوسط، أثناء تعرضها لحركة تباعدية بالقشرة القارية، ومصاحبة بنشاط صهيري (anorogenic magmatism) (شكل ٦-١٥). تتمثل الصخور الحاوية على رواسب اليورانيوم في جرانيتات مجواه، أو مهشمة، وأيضاً في تتابعات



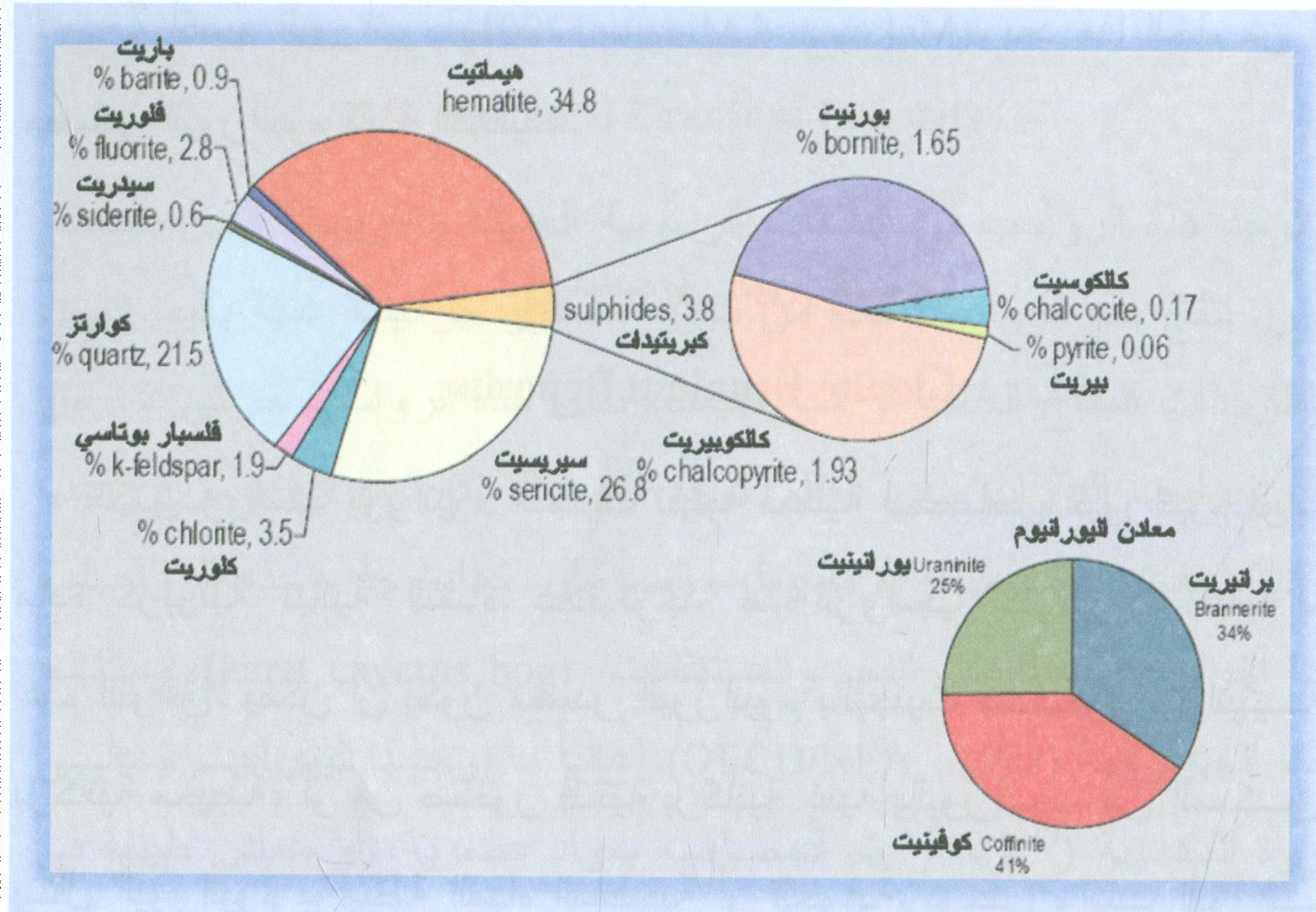
شكل ٦-١٤: عمليات التعدين برواسب أوليبمك دام Olympic Dam بجنوب استراليا.

www.bhpbilliton.com/bbContentRepository/200612180872/olympicdam2006.pdf



شكل ٦-١٥: شكل تخطيطي يبين البيئة الجيولوجية لنشأة رواسب أوليمبيك دام، استراليا.

www.bhpbilliton.com/bbContentRepository/200612180872/olympicdam2006.pdf



شكل ٦-١٦: المعادن الممثلة لرواسب أوليمبيك دام، استراليا.

www.bhpbilliton.com/bbContentRepository/200612180872/olympicdam2006.pd

من الصخور البركانية الفتاتية والرسوبية (Volcaniclastic). تتميز تلك الرواسب بمحتواها العالي من الهيماتيت والماجنيتيت، وأنواعًا أخرى من أكاسيد الحديد الناتجة عن عمليات التحوال السائلي. تم تفسير نشأة هذه الرواسب على أنها نتاج عملية إحلال لمحاليل حرمائية غنية بالحديد لمعادن سيليكات الألومنيوم، خلال مرورها بالكسور والفواصل (Oreskes and Hitzman, 1993). يتكون هذا الراسب من معادن كبريتيدات النحاس والحديد (Cu-Fe sulfides)، واليورانينيت، والكوفينيت، وقليل من البرانيريت، بالإضافة إلى المعادن الأخرى الموضحة بشكل (٦-١٦). توجد هذه الصحبة المعدنية بصخور الجرانيت المهشمة، والغنية بالهيماتيت، والتي تكونت منذ ١٥٩٠ مليون عام (Johnson and Cross, 1995)، يصل إجمالي الخام إلى ٢٥٤٧ مليون طن، وتصل درجة الخام إلى

٠,٠٤٪ أكسيد اليورانيوم (Mckey and Miezitis, 2001). يعد هذا الخام من أكبر مصادر اليورانيوم قليلة التكاليف.

٧- رواسب يورانيوم اللجنيت

Lignite Uranium Deposits

تتكون رواسب يورانيوم اللجنيت نتيجة لعملية ادمصاص لليورانيوم بواسطة مادة كربونية نباتية النشأة. عادةً توجد هذه الرواسب كتركيزات طبقية أسفل عدم التوافق. يمكن أن يكون مصدر اليورانيوم باللجنيت صخور جرانيتية أو بركانية محيطة، أو من صخور فتاتية بركانية غنية باليورانيوم. من الممكن أن ينتقل اليورانيوم بواسطة المياه السطحية أو الجوفية. توجد رواسب اليورانيوم المصاحبة للجنيت على شكل طبقي، حيث تمثل مصدرًا قليلاً إلى متوسط لخام منخفض الدرجة، مثال، شمال وجنوب داكوتا بالولايات المتحدة الأمريكية (Denson and Gill, 1965).

أدى استكشاف اللجنيت في غرب داكوتا الشمالية، ومونتانا الشّرقيّة، إلى اكتشاف كميات بسيطة من اليورانيوم في لجنيت الباليوسين. قدرت الاحتياطيّات المحتملة لأكثر من ٢٠٠٠٠٠ طنّ من اللجنيت، الحاوي على أكثر من ٠,١٠ في المائة من أكسيد اليورانيوم. تركزت الرواسب المتطبقة والعدسية في كلا المنطقتين باللجنيت وطبقات الحجر الرملي، بفعل المياه الجوفيّة. يوجد معظم اليورانيوم في صورة معقدات اليورانيوم والكربون. يمثل الميتا-تيامونيت، والأوتونيت، أهم معادن اليورانيوم الثانويّة (Towse, 1957).

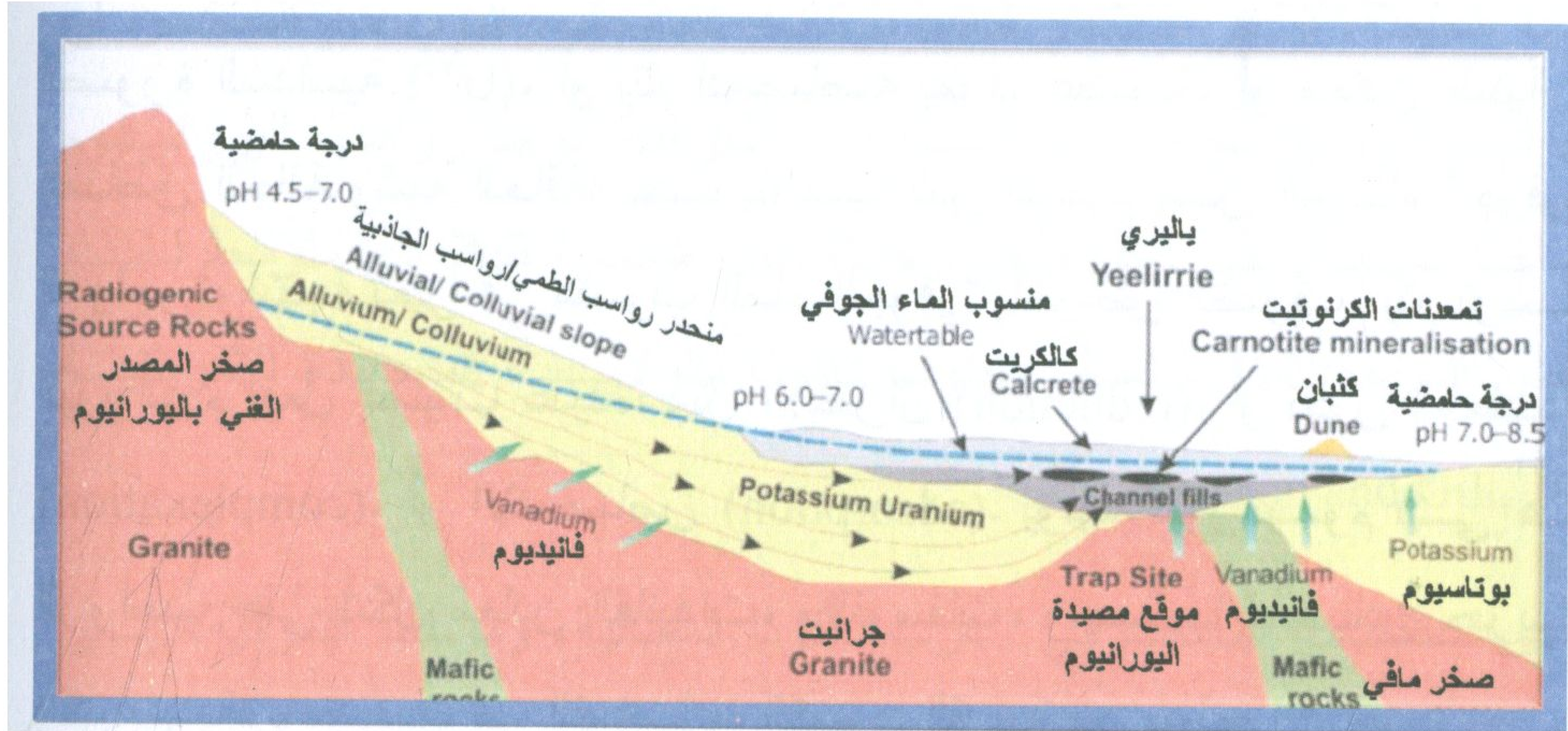
٨- رواسب اليورانيوم السطحية

Surficial Uranium Deposits

توجد هذه الرواسب في الطبقات الرسوبية الحديثة والقريبة من سطح الأرض. تنتج هذه الرواسب عادةً من تجوية صخور جرانيتية غنية باليورانيوم، بالمناطق ذات المناخ الجاف أو شبة الجاف. تمثل هذه الرواسب حوالي ٤٪ من إجمالي رواسب اليورانيوم في العالم. توجد أشهر الأمثلة لهذا النوع من رواسب اليورانيوم باستراليا، وصحراء ناميبيا، والصومال. كما توجد هذه الرواسب ببيئات أخرى مثل تواجدات الفحم والمستنقعات (karst caverns bog)، ومالئه للبنيات الجيولوجية (OECD/NEA, 1998). غالباً ما يوجد اليورانيوم على الصورة السداسية (U^{VI})، أو يتم ادمصاصه بمواد عضوية، أو معادن طينية في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث يترسب اليورانيوم من المياه الجوفية المهاجرة، نتيجة تغير في منسوب الماء الجوفي بأحواض الصرف. يتم ترسب اليورانيوم بفعل عمليات عديدة، مثل الاختزال (reduction)، أو تكّون المعقدات (complexation)، أو الادمصاص (adsorption). يوجد اليورانيوم في هذه الرواسب على شكل معادن الفانيدات، والفوسفات، ومصاحباً لمعادن جيرية، وكبريتيدية، وحديدية، في الفواصل والكسور القريبة منْ سطح الأرض.

يوجد أكبر هذه الرواسب بصخور الحجر الجيري والدولوميتي، من عمر الثلاثي (Tertiary) إلى الحديث (Recent)، والتي توجد على شكل طبقات متبادلة، مع أخرى من الرمل والطين. يتواجد اليورانيوم في صورة معدن الكارنوتيت (carnotite). رغم أن هذه الرواسب من نوعية الخامات منخفضة الدرجة، إلا أن انتشارها الواسع يكسبها أهمية اقتصادية كمصدر لليورانيوم. تعتبر رواسب يورانيوم الكالكريت calcrete (كربونات الكالسيوم والماغنسيوم)

أكثر رواسب اليورانيوم السطحية شيوعاً. تكثر هذه الرواسب بالمناطق شديدة التجوية حيث الجرانيت الغنيّ باليورانيوم بالمناطق ذات المناخ الجافّ إلى شبه الجافّ. يوجد أكبر رواسب اليورانيوم السطحية بمنطقة ياليري (Yeelirrie) بغرب أستراليا (شكل ٦-١٧) حيث تحتوى على ٥٢٥٠٠ طن من خام اليورانيوم، بدرجة ٠,١٥٪ أكسيد اليورانيوم. ومن الأمثلة الأخرى منطقة لانجرهينريش (Langer Heinrich) بناميبيا، حيث يحتوي الخام على احتياطي ١١١٥٥ طن، بدرجة ٠,١١٪ أكسيد اليورانيوم (المصدر: Paladin Resources website).



شكل ٦-١٧: نموذج توضيحي لطريقة تكوّن رواسب اليورانيوم السطحية بمنطقة ياليري Yeelirrie بغرب استراليا (Mann and Deutscher, 1978).

٩- رواسب اليورانيوم المصاحبة للفوسفات

يمكن أن تحتوى رواسب الفوسفات على تركيزات منخفضة من اليورانيوم (٠,٠١ - ٠,٠١٥ ٪ أكسيد اليورانيوم U_3O_8)، بداخل معادن الأباتيت والفلور-أباتيت. رغم انخفاض درجة الخام، إلا أن وجود هذا النوع من

الرسوبيات بكميات كبيرة، سمح باستخراج كميات من أكسيد اليورانيوم. على سبيل المثال في منطقة فلوريدا بالولايات المتحدة الأمريكية، حيث يتم إنتاج اليورانيوم كمنتج جانبي عند صناعة حامض الفوسفوريك. ومن الأمثلة الأخرى رواسب الفوسفات بحوض جيورجينا (Georgina basin) بكوينز لاند (Queensland)، والتي تحتوي على معدل ٠,٠١٢٦٪ من أكسيد اليورانيوم (Mckay and Miezitis, 2001). يتكّون اليورانيوم برواسب الفوسفات من جراء عملية إحلال أيون اليورانيل محل أيون الكالسيوم بالأباتيت، يساعد معدل الترسيب البطئ لهذه الرواسب على عملية الإحلال، وأيضا النشاط المنخفض لثاني أكسيد الكربون، والذي يعمل على بقاء اليورانيوم بالمحاليل (Dahlkamp, 1993). موارد اليورانيوم العالميّة في صخور الفوسفات غير معروفة بشكل جيد، يوضح جدول (٦-٢) قائمة تقريبية عن كميات اليورانيوم برواسب الفوسفات في بعض الدول.

جدول ٦-٢: قائمة تقريبية عن كميات اليورانيوم برواسب الفوسفات في بعض الدول.

فوسفوريت بحري Marine phosphorite		فوسفوريت عضوي Organic phosphorite	
البلد	كمية اليورانيوم (مليون طن)	البلد	كمية اليورانيوم (مليون طن)
المغرب	٦,٩	كازاخستان روسيا	٠,١٢
الولايات المتحدة الأمريكية	١,٢		
المكسيك	٠,١٥		
الأردن	٠,١		
بلاد أخرى	٠,٦٥		
المجموع	٩	المجموع	٠,١٢

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية ٢٠٠٠ IAEA.

١٠- رواسب اليورانيوم المصاحبة للطفله السوداء

تشمل هذه الرواسب على تركيزات منخفضة من اليورانيوم (٠,٠٠٥٪ أكسيد اليورانيوم)، بالطفلة الكربوناتية المتكونة بالبيئة البحرية بصخور الحياة القديمة السفلي (lower Paleozoic)، مثل رواسب الطفلة الغنية باليورانيوم، بعصر الكمبري الأوسط، بمنطقة رانستاد بالسويد (Ranstad). تحتوي هذه الطفلة على كمية كبيرة من المادة العضوية، بالإضافة إلى البيريت والماركزيت، وبعض الطبقات الرقيقة المتبادلة من الفوسفات. تمتد هذه الرواسب مئات، بل آلاف الكيلومترات. يعتقد أن هذه الرواسب قد تكونت نتيجة ادمصاص اليورانيوم بداخل أو على سطح حبيبات الطين، والمادة العضوية من مياه البحر. تتراوح تركيزات اليورانيوم من ٥٠ إلى ٤٠٠ جزء في المليون (ppm). يمثل اليورانيوم في هذه الرواسب منتجًا جانبيًا لإنتاج البترول، أو إنتاج الفلزات الأخرى، مثل الكوبالت، والكروميوم، والمولبدينم، والمنجنيز، والفانيديوم، والعناصر الأرضية النادرة (REE).

المراجـــــع

١- المراجع العربية

الفيلالى، عصام، وحمدي، عبد النبي، ويحيى، داود، وعلي، عثمان (٢٠٠٧م) *علم المعادن: مقدمة في علم المعادن*. مكتبة الأنجلو المصرية. القاهرة. ٣٥٨ صفحة.

حلمي، محمد عز الدين (١٩٧٧م) *علم المعادن*. التحريرة الرابعة، مكتبة الأنجلو المـصرية، ٤٧٠ صفحة.

سليمان، مصطفى محمود (١٩٨٦م) جيولوجيا *الخامات والرواسب المعدنية*. الجزء الثـاني، مطبوعات جامعة الزقازيق، مصر.

سليمان، مصطفى محمود (٢٠٠١م) *الجيولوجيا الاقتصادية والثروة المعدنيـة فـي الـوطن العربي*. الجزء الأول، دار الكتاب الحديث، القاهرة.

حسن، ممدوح عبد الغفور (١٩٧٩م) *الرواسب المعدنية*. مكتبة الأنجلو المصرية، القاهرة.

حسن، ممدوح عبـدالغفور (١٩٩٥م) *الأسلحة النووية ومعاهدة عدم الانتشار*. الشركة العربية للنشر والتوزيع، ١٠٩ صفحة.

حسن، ممدوح عبدالغفور (٢٠٠٠م) *الثقافة النووية للقرن ٢١ : ما يجـب أن تعرفـه عـن أساسيات التكنولوجيا النووية*. دار الفكر العربي.

٢- المراجع الأجنبية

Abd El-Naby, H. (2008) Genesis of secondary uranium minerals associated with jasperoid veins, El Erediya area, Eastern Desert, Egypt. *Mineralium Deposita* **43** (8): 933-944.

Abd El-Naby, H. (2009a) Role of geochemical alteration on the formation of secondary Zr- and U-bearing minerals in El Atshan trachyte, central Eastern Desert, Egypt. *J. Mineralogical and Petrological Sciences* **104**: 37-51.

Abd El-Naby, H. (2009b) High and low temperature alteration of uranium and thorium minerals, Um Ara granites, south Eastern Desert, Egypt. *Ore Geology Review* **35** (3-4): 436-446.

Abd El-Naby, H. (2009c) Role of argillic alteration in uranophane precipitation along shear zones of the Gattar granites, Eastern Desert, Egypt. *J. of King Abdulaziz University: Earth Sciences* **20** (2): 45-69.

Abd El-Naby, H. and **Dawood, Y.H.** (2008) Natural attenuation of uranium and formation of autunite at the expense of apatite within an oxidizing environment, south Eastern Desert of Egypt. *Applied Geochemistry* **23**: 3741–3755.

Abd El-Naby, H.H. and **Frisch, W.** (2006) Geochemical constraints from the Hafafit Metamorphic Complex (HMC): evidence of Neoproterozoic back-arc basin development in the central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences* **45**: 173-186.

Abdalla, H.M. (1996) Geochemical and mineralogical studies at Um Ara rare metals prospect, Southeastern Desert, Egypt. *Ph.D. Thesis,* Hokkaido University, Sapporo, Japan.

Abdalla, H.M., Ishihara, S., Matsueda, H. and **Abdel-Monem, A.A.** (1996) On the albite-enriched granitoids at Um Ara area, Southeastern Desert, Egypt: I) Geochemical, ore potentiality and fluid inclusion studies. *J. Geochemical Exploration* **57**: 127-138.

Abdel Meguid, A.A. (1986) Geologic and radiometric studies of uraniferous granite in Um Ara–Um Shilman area, south Eastern Desert, Egypt. *Ph.D. Thesis,* Suez Canal University, Egypt, 241 p.

Abdel-Monem, A.A. and **Hurley, P.M.** (1979) U-Pb staing of zircons from psammitic gneisses, Wadi Abu Rusheid-Wadi Sikait area, Egypt. *Institute of Applied Geology, Jeddah* **3** (2): 165-170.

Abdelouas, A., Lutze, W. and **Nuttall, H.E.** (1999) Uranium contamination in the subsurface: Characterization and remediation. In: Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment (Eds. BURNS, P.C. and FINCH, R.). *Reviews in Mineralogy* **38**: 433-474.

Abu-Deif, A. (1985) Geology of uranium mineralization in El Missikat area, Qena-Safaga road, Eastern Desert, Egypt. Unpub. *M.Sc. Thesis,* Al-Azhar University, 103 p.

Abu-Deif, A. (1992) The relation between the uranium mineralization and tectonics in some Pan-African granites, West of Safaga, Eastern Desert, Egypt. Unpub. *Ph.D. Thesis,* Assiut University, 216 p.

Abu-Deif, A., Abouelnaga, H.S. and **Hassanein, H.I.** (2001) Distribution of radioelements and its relation to uranium migration, El Erediya exploratory tunnels, central Eastern Desert, Egypt. *J. of King Abdulaziz University (Earth Sci.)* **13**: 19-40.

Adler, H.H. (1974) Concepts of uranium-ore formation in reducing environments in sandstones and other sediments. *In Formation of Uranium Ore Deposits (Vienna: IAEA.)*: 141-168.

Afia, S.A. and **Mansour, A.O.** (1977) Development of mineral resources in the Arab Countries. *Industrial Development Centre for the Arabian Countries, Cairo*, 728p. (in Arabic).

Ahmad, M.I. (1957) *Report on the reconnaissance survey in Saudi Arabia.* Saudi Arabian Dir. Gen. Miner. Resour. Open-File Report. DGMR-69.

Allard, B., Olofsson, U., Torstenfelt, B. and **Andersson, K.** (1982) Sorption of actinides in welldefined oxidation states on geologic media. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **11**: 775-782.

Almohandis A.A. (1993) "Potential Uranium Deposits in Saudi Arabia". *Annals of the Geological Survey of Egypt* **19**: 57-70.

ATSDR (1999) *Toxicological Profile for Uranium.* Washington: US Public Health Services, 398 p.

Attawiya, M.Y.A. (1971) Mineralogical and geochemical studies of the primary ore at El Atshan, Eastern Desert, Egypt. *M.Sc. Thesis,* Ain Shams University, Cairo.

Awadallah, G.S. (1999) Mineralogical and geochemical characteristics of uranium-bearing granites, North Um Ara, Southeastern Desert, Egypt, with emphasis on uranium extraction. *Ph.D. Tthesis,* Faculty of Science, Cairo University, 148 pp.

Bajwah, Z.U. (1994a) Alligator River, Northern Territory, 1:250 000 mineral deposit data series report, SD 53-01. *Northern Territory Geological Survey, Darwin.*

Bajwah, Z.U. (1994b) A contribution of geology, petrology, and geochemistry to the Cullen Batholith and related hydrothermal activity responsible for mineralisation, Pine Creek Geosyncline, Northern Territory. *Northern Territory Geological Survey, Report* **8**.

Barnicoat, A.C., Henderson, I.H.C., Knipe, R.J., Yardley, B.W.D., Napier, R.W., Fox, N.P.C., Kenyon, A.K., Muntingh, D.J., Strydom, D., Winkler, K.S., Lawrence, S.R. and **Conford, C.,** (1997) Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature,* **386**: 820–824.

Bartel, N., Herring, T.A., Ratner, M.I., Shapiro, I.I. and **Corey, B.E.** (1986) VLBI limits on the proper motion of the 'core' of the superluminal quasar 3C345. *Nature* **319**: 733-738.

Basson, I.J. and **Greenway, G.** (2004) The Rössing uranium deposit: A product of late-kinematic localization of uraniferous granites in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia. *Journal of African Earth Sciences* **38**: 413-435

Berning, J. (1986) The Rössing Uranium Deposit, Namibia. In: *Mineral Deposits of Southern Africa.* Vol. II 1819-1832, Geological Society of South Africa, Johannesburg.

Berning, J., Cooke, R., Hiemstra, S.A. and **Hoffman, U.** (1976) The Rössing uranium deposit, South West Africa. *Economic Geology* **71**: 351–368.

Berthault, B. and **Harrop, D.W.** (1990) Annual report, 1989. Allamber. *Northern Territory Geological Survey,* Open File Company Report CR1990-0044.

Bibler, J.P. and **Marson, D.B.** (1999) Behaviour of mercury, lead, ceasium and uranyl ions on four SRS soils (U). In: S. Keith, W. Spoo, J. Corcoran, (ed.), *Toxicological Profile for Uranium. Atlanta (USA).* Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 462 p.

Bigu, J. and **Duport, P.** (1992) Characterization of long-lived radioactive dust in uranium mill operations. *Am. Ind. Hyg. Asso.* **53**: 588-595.

Bleise, A., Danesi, P.R. and **Burkart, W.** (2003) Properties, use and health effects of depleted uranium (DU): A general overview. *J. Environ. Radioact* **64**: 93-112.

Boult, K.A., Cowper, M.M., Heath, T.G., Sato, H., Shibutani, T. and **Yui, M.** (1998) Towards an understanding of the sorption of U(VI) and Se(IV) on sodium bentonite. *Journal of Contaminant Hydrology* **35**: 141-150.

British Geological Survey (2007) MINERAL ROFILE: Uranium. *Natural Environment Research Council*, 33 p.

Brookins, D.G. (1988) *"Eh-pH-pE Diagrams for Geochemistry,"* Springer-Verlag, New York.

Bruno, J., De Pablo, J., Duro, L. and **Figuerola, E.** (1995) Experimental study and modelling of the U (VI)-Fe$(OH)_3$ surface precipitation/ coprecipitation equilibria. *Geochim. et Cosmochim. Acta.* **59**: 4113-4123.

Burkart, W., Danesi, P.R. and **Hendry, J.H.** (2005) Properties, use and health effects of depleted uranium. *Int. Congress Series* **1276**: 133–136.

Burns, P.C. (1999) The crystal chemistry of uranium. In (Burns, P.C., Finch, R., eds.) Uranium: Mineralogy, geochemistry and the environment; Reviews in Mineralogy. *Min. Soc. Amer.* **38**: 23-90.

Burns, P.C. and **Finch, R.** (1999) Uranium – Mineralogy, Geochemistry and the Environment. Reviews in Mineralogy, Washington: *Mineralogical Society of America* **38**.

Casas, I., Casabona, D., Duro, L. and **Depablo, J.** (1994) The influence of hematite on the sorption of uranium (VI) onto granite filling fractures. *Chemical Geology* **113**: 319-326

Chisholm-Brause, C., Conradson, S.D., Buscher, C.T., Eller, P.G. and **Morris, D.** (1994) Speciation of uranyl sorbed at multiple binding sites on montmorillonite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**: 3625-3631.

Collot, B. (1981) Le granite albitique hyperacalin de Bokan Mountain (S.E. Alaska) et ses mineralisations U-Th. Sa place dans la Cordillere Canadienne. *Doct. Thesis,* Université de Montpellier II, Montpellier, France, 238p.

Coppin, F., Berger, G., Bauer, A., Castet, S. and **Loubet, M.** (2002) Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chem. Geol.* **182**: 57-68.

Cramer, J.J. and **Smellie, J.A.T.** (1994) Final report of the AECL/SKB Cigar Lake analog study, Atomic Energy of Canada Limited report, AECL-0851, COG-93-147, SKB TR 94-04 [R]. *Canada: Atomic Energy of Canada Limited.*

Cuney, M. (1980) Preliminary results on the petrology and fluid inclusions of the Röossing uraniferous alaskites. *Transactions of the Geological Society of South Africa* **83**: 39–45.

Dabous, A.A. (2003) Secondary uranium in phosphorites and its relation to groundwater in Egypt. *Geochemical Journal* **37** (4): 413-426.

Dahlkamp, F.J. (1993) *Uranium Ore Deposits.* Springer-Verlag, Berlin, 460 p.

Dahlkamp, F.J. (1980) In: P.F. Burottet, V. Ziegler, (ed.), *Energy Resources.* 26^{th} Intern. *Geol. Congr. Colloquium* **C2**: 499-536.

Dahlkamp, F.J. (1989) Classification scheme for uranium ore deposits. A stage of the art review (IAEA-TC-542/3). *Proc. Technical Committee meeting, Vienna, 12 March 1987. 1-31, IAEA, Vienna.*

Dawood, Y. H. (2001) "Uranium-series disequilibrium dating of secondary uranium ore from south Eastern Desert of Egypt", *Applied Radiation and Isotopes* **55** (6): 881-887.

Dawood, Y.H. (2003) Chemical composition of uranophane associated with peraluminous granite, north Eastern Desert of Egypt. *M.E.R.C. Ain Shams Univ., Earth Sci. Ser.* **17**: 43-57.

Dawood, Y.H. (2010) Mineral chemistry and genesis of uranyl minerals associated with psammitic gneisses, Abu Rusheid area, South Eastern Desert of Egypt. *J. of King Abdulaziz University: Earth Sciences* **21**(1): 137-169.

Dawood, Y.H. and **Abd El-Naby, H.H.** (2001) Mineralogy and genesis of secondary uranium mineralization, Um Ara area, south Eastern Desert, Egypt. *Journal African Earth Science* **32**: 317–323.

Dawood, Y.H., Abd El-Naby, H.H. and **Sharafeldin, A.A.** (2004) Influence of the Alteration Processes on the Origin of Uranium and Europium Anomalies in Trachyte, Central Eastern Desert, Egypt. *J. Geochemical Exploration* **88**: 15-27.

Dawood, Y.H., Harbi, H. and **Abd El-Naby, H.H.** (2010) Genesis of kasolite associated with aplite-pegmatite at Jabal Sayid, Hijaz region, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal Asian Earth Sciences* **37**: 1-9.

Denson, N.M. and **Gill, J.R.** (1965) Uranium-bearing lignite and carbonaceous shale in the southwestern part of the Williston Basin—A regional study. *U.S. Geological Survey Professional Paper* **463**, 75 p.

Dongarra, G. (1984) Geochemical behavior of uranium in the supergene environment in Uranium geochemistry, mineralogy, geology, exploration and resources. In: B.D. Vivo, F.I.G. Capaldi, P.R. Simpson, (ed). *Institution of Mining and Metallurgy, London, U.K.*: 18-22.

Drysdall, A.R. and **Douch, C.J.** (1986) Nb-Th-Zr Mineralization in microgranite-microsyenite at Jabal Tawlah, Midyan region, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences* **4**: 275-288.

El Hazek, N.M.T. (1968) The primary ore at El Atshan and its physical and chemical properties (with special technological applications). *Ph.D. Thesis,* Ain Shams University, Cairo.

El Kassas, I.A. and **Bakhit, F.S.** (1989) Geology of Wadi Atalla-El Missikat area, Eastern Desert, Egypt. *Qatar Univ. Sci. Bull.* **9**: 227-244.

El Ramly, M.F., Greiling, R.O., Rashwan, A.A. and **Rasmy, A.H.** (1993) Explanatory note to accompany the geological and structural maps of Wadi Hafafit area, Eastern Desert of Egypt. *Geological Survey of Egypt,* Paper No. 68.

El Tahir, M.A. (1985) Radioactivity and mineralization of granitic rocks of El Erediya occurrence and comparison to El Missikat Rei El-Garra occurrence, Eastern Desert, Egypt. Unpub. *Ph.D. Tthesis,* Al-Azhar University, 132 p.

El-Kammar, A.M., El-Hazik, N., Mahdi, M. and **Aly, N.** (1997) Geochemistry of accessory minerals associated with radioactive mineralization in the central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* **25** (2): 237-252.

El-Kammar, A.M., Salman, A.E., Shalaby, M.H. and **Mahdy, A.I.** (2001) Geochemical and genetical constraints on rare metals mineralization at the central Eastern Desert of Egypt. *Geochem. Jour.* **35** (2): 117-135.

Fander, H.W. (1981) Final report EL 2055, Adelaide River NT. Urangesellschaft Australia Pty Ltd. *Northern Territory Geological Survey,* Open File Company Report CR1981-0160.

Faure G. (1986) *Principles of Isotope Geology,* Second edition. John Wiley and Sons, New York, 589p.

Fayek, M., Janeczek, J. and **Ewing, R.C.** (1997) Mineral chemistry and oxygen isotopic analyses of uraninite, pitchblende and uranium alteration minerals from the Cigar Lake deposit, Saskatchewan, Canada. *Applied Geochemistry* **12**: 549-565.

Fayek, M. and **Kyser, T.K.** (1997) Characterization of multiple fluid flow events and rare-earth-element mobility associated with formation of unconformity-type uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan. *The Canadian Mineralogist* **35**: 627–658.

Finch, R.J. (1994) Paragenesis and crystal chemistry of the uranyl oxide hydrates. *Ph.D. Thesis,* University of New Mexico, 257 p.

Finch, W.I. (1996) Uranium Provinces of North Amrerica-Their definition, Distribution, and Models. *USGS Bull.* **2141**, 18 p.

Finch, R. and **Murakami, T.** (1999) Systematics and paragenesis of uranium minerals. In: P.C. Burns and R. Finch (ed.), *Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment. Reviews in Mineralogy* **38**: 91-180.

Firman, J.B. (1954) Diamond drilling in the Edith River uranium-bearing area, NT. *Bureau of Mineral Resources, Australia*, Record 1954/070.

Firman, J.B. (1955) Surface geology at the Fleur de Lys mine near Brocks Creek. *Bureau of Mineral Resources, Australia*, Record 1955/011.

Fletcher, B.A. (1981) *Engo Valley – Skeleton Coast, Geological Report Grants M46/3/51,490 and 722.* Unpublished report, General Mining and Finance Corp. Galloway, S.S., Ransom, A.

Frondel, C. (1958) Systematic mineralogy of uranium and thorium. *United States Geological Survey Bulletin* **1064**, 400 pp.

Fuzrrawa, K. (1980) Estudos preliminares de incluses fluidas em albita dos albititos do projeto Lagoa Real, Caetit6, BA, Brasil. Anais *XXXI Congr. Bras. Geol. (Santa Catarina)* **4**: 2038-2049.

Gaafar, M.I., Ghazala, H.H., Ibrahim, T.M. and **Ammar, S.E.** (2006) Gamma ray spectrometry studies for a Promising vein type uranium mineralization, South Eastern Desert, Egypt. *Proc.4th International Symposium on Geophysics, Tanta, Egypt*: 445-456.

Gardner, D.E., Rade, J. and **Britten, R.A.** (1955) Geological report on the ABC uranium prospect near Katherine, Northern Territory. *Bureau of Mineral Resources, Australia,* Record 1955/041.

Gindler, J.E. (1973) Physical and Chemical Properties of Uranium. In: H.C. Hodge, J.N. Stannard and J.B. Hursh (ed.) *Uranium, Plutonium, Transplutonic Elements.* New York, Springer-Verlag: 69-164.

Goldstein, S.J. and **Stirling, C.H.** (2003) Techniques for Measuring Uranium-series Nuclides: 1992-2002. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **52**: 23-57.

Greenberg, J.K. (1981) Characteristics and origin of Egyptian younger granites. *Geological Society of America* **92** (1): 224-232, (2): 749-840.

Greenwood, N.N. and **Earnshaw, A.** (1984) *Chemistry of the Elements.* London, Pergamon Press, 1542 p.

Hackett, D. (1984) Jabal Sayid rare earth prospect: drilling results and resource evaluation. *Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources,* Open-File Report DGMR-OF-04-26.

Hackett, D. (1986) Mineralized aplite-pegmatite at Jabal Sayid, Hijaz region, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences* **4**: 257-267.

Hassan, M.A. (1973) Geology and geochemistry of radioactive columbite-bearing psammitic gneiss of Wadi Abu Rusheid South Eastern Desert, Egypt. *Annals of the Geological Survey of Egypt* **III**: 207-225.

Helmy, H.M. (1999) Mineralogy, fluid inclusions and geochemistry of the molybdenum-uranium-fluorite mineralizations, Gebel Gattar area, Eastern Desert, Egypt. Intern. *Conf. on Geochemistry, Alexandria University*, 15–16 Sept. 1999: 171-198.

Hsi, C-K.D. and **Langmuir, D.** (1985) Adsorption of uranyl onto ferric oxyhydroxides: Application of the surface complexation site-binding model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **49**: 1931-1941.

Hoeve, J. and **Sibbald, T.I.I.** (1978) On the genesis of Rabbit Lake and other unconformity-type uranium deposits in northern Saskatchewan, Canada. *Economic Geology* **73**: 1450–1473.

Hoeve, J. and **Quirt, D.** (1987) A stationary redox front as a critical factor in the formation of high grade, unconformity-type uranium ores in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada. *Bulletin de Minéralogie* **110**: 151–171.

Holland, H.D. (1984) *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans.* Princeton Univ. Press, Princeton.

Hussein, H.A. and **El Kassas, I.A.** (1972) Occurrence of some primary uranium mineralization at El Atshan locality, Central Eastern Desert. Egypt. *Journal of Geology* **14**: 97-110.

Hussein, H.A., Faris, M.I. and **Assaf, H.S.** (1970) Radioactivity and geology of El Atshan locality, Eastern Desert, Egypt. Arabian *Journal of Nuclear Sciences and Applications* **3**: 61-68.

Hussein, H.A., Hassan, M.A., El Tahir, M.A. and **Abu-Deif, A.** (1986) Uranium bearing siliceous veins in younger granites, Eastern Desert, Egypt. *Report of the Working Group on Uranium Geology, IAEA, Vienna*, TECDOC 361, 143-157.

IAEA (2000) Introduction of nuclear desalination: a Guidebook, *IAEA-Technical Report Series* **400**.

Ibrahim, M.E. (1986) Geologic and radiometric studies on Um Ara granite pluton, south east Aswan, Egypt. *M.Sc. Thesis,* Monsoura University, Egypt, 177 p.

Ibrahim, M.E. (1994) Geochemistry and extraction of uraniumfrom the uraniferous granite of Um Ara, Southeastern Desert. *M.Sc. Thesis,* Cairo University, 152p.

Ibrahim, T.M.M., Amer, T.E., Ali, K.G. and **Omar, S.M.** (2007) Uranium potentiality and its extraction from El Sela shear zone, South Eastern Desert Egypt. *Sci. Fac. Sci. Minufia Univ.* **XXI**: 1–18.

International Atomic Energy Agency (2007) Uranium Geology and Deposits, Exploration, Mining and Milling and Environmental Issues. *Seminar on Nuclear Science and Technology for Diplomats Vienna*, 6 – 8 February 2007.

Isobe, H., Murakami, T. and **Ewing, R.C.** (1992) Alterarion of uranium minerals in the koongarra deposit, Australia: Unweathered zone. *J. of Nucl. Material* **190**: 174-187.

Ivanovich, M. and **Harmon, R.S.** (1982) *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems.* Clarendon Press, Oxford, England, 571 p.

Ivanovich, M. and **Harmon R.S.** (1992) *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Science.* Clarendon Press, Oxford.

Johnson, J.P. and **Cross, K.C.** (1995) U-Pb Geochronological constraints on the genesis of the Olympic Dam Cu-UAu-Ag deposit, South Australia. *Economic Geology* **90**: 1046–1063.

Kim, J.I. (1986) Chemical behaviour of transuranic elements in natural aquatic systems. In: F.A.J. Keller, (ed.), *Handbook on the Physics and Chemistry of the Actinides.* Amsterdam. Elsevier Science Publisher: 413-455.

Kim, J.I. (1993) The chemical behaviour of transuranium elements and barrier functions in natural aquifer systems. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **294**: 3-21.

Kröner, A., Retief, E.A., Compston, W., Jacob, R.E. and **Burger, A.J.** (1991) Single-grain and conventional zircon dating of remobilised basement gneisses in the central Damara Belt of Namibia; South African. *Journal of Geology* **94**: 379-387.

Kruse, P.K., Sweet, I.P., Stuart-Smith, P.G., Wygralak, A.S., Pieters, P.E. and **Crick, I.H.** (1994) Katherine. 1:250 000 geological map series explanatory notes SD 53-9. *Northern Territory Geological Survey, Darwin and Australian Geological Survey Organisation*, Canberra (National Geoscience Mapping Accord).

Kyser, T.K., Hiatt, E., Renac, C., Durocher, K., Holk G. and **Deckart, K.** (2000) Diagenetic fluids in paleo- and meso-proterozoic sedimentary basins and their implications for long protracted fluid histories. In: K. Kyser, (ed.), *Fluids and Basin Evolution.* Short Course Series, Mineralogical association of Canada, Calgary: 225–262.

Lally, J.H. (2002) Stratigraphy, structure and mineralization of the Rum Jungle mineral field. *Northern Territory Geological Survey*, Record 2002-005.

Lambert, I., Mckay, A. and **Miezitis, Y.** (1996) Australia's uranium resources, Trend Gbbal Comparison and new Developments. *Bureau of Resource Sciences*, Canberra , 20p.

Langmuir, D. (1978) Uranium solution-minerals equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim. and Cosmochim. Acta* **42**: 547-569.

Langmuir, D. (1997) Aqueous Environmental Geochemistry. *Prentice Hall, Upper Saddle River*, NJ, 600p.

Lide, D.R. (1994) Uranium. In: D.R. LIDE, (ed.), *Handbook of Chemistry and Physics*. 74th ed., Boca Raton (USA): CRC Press: 31-32.

Lovely, D.R., Widman, P.K., Woodward, J.C. and **Phillips, E.J.P.** (1993b) Reduction of uranium by Cytochrome c3 of Desulfovibrio desulfuricans. *Appl. Environ. Microbiol.* **59**: 3572-3576.

Lumpkin, G.R. and **Ewing, R.C.** (1996) Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: betafite subgroup. *American Mineralogist* **81**: 1237-1248.

MacDowell, S.D. and **Elders, W.A.** (1980) Authigenic layer silicate minerals in bore hole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California. *Contrib Mineral Petrol* **74**: 293–310.

Mahdy, M.A., Salman, A.B. and **Mahmoud, A.H.** (1990) Leaching studies on the uraniferous Hammamat sediments, Wadi Bali, Northern Eastern Desert, Egypt. Egypt. *Congress of Mining and Metallurgy 14th*, Edinburgh Scotland: 229-235.

Mann, A.W. and **Deutscher, R.L.** (1978) Genesis principles for the precipitation of carnotite in calcrete drainages in Western Australia. *Economic Geology* **731**: 1724–1737.

Mansour, S.E.I., El-Afandy, A.H., Abdalla, H.M., Saleh, G.M., Abd El-Naby, H.H., Abdel Wahed, A.F., Farag, S.A., Assran, H.M., Ahmed, A.A., Rashed, M.A. and **Abdel Shafy, A.M.** (2000) Uranium potentiality of Um Ara area, Southeastern Desert, Egypt. *Internal report, Nuclear Materials Authority, Cairo, Egypt*, 132 p.

Marlow, A.G.M. (1981) Remobilisation and primary uranium genesis in the Damaran orogenic belt. *Ph.D. Dissertation,* Leeds University, 277p.

Matzko, J.J. and **Ibne Naqvi, M.** (1976) Laboratory examination of selected samples ofonomalous radioactive Wajid sandstone southern Arabia.*U.S.G.S. Saudi Arabia Project Report* **208**.

McAndrew, J. (1954) Uranium ore from Fleur de Lys lease, Brocks Creek, NT. *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Mineralographic Investigation Report* **591**.

McKay, A.D. and **Miezitis, Y.** (2001) Australia's Uranium Resources, Geology and Development of deposits. *AGSO Geoscience Australia, Mineral Resource Report* **1**, ISNB 0 642 46716 1.

Meinrath, A., Schneider, P. and **Meinrath, G.** (2003) Uranium ores and depleted uranium in the environment, with a reference to uranium in the biosphere from the Erzgebirge/Sachsen, Germany. *J. Environ. Radioact.* **64**: 175-193.

Mock, O.R. and **Ohmoto, H.** (1998) Two-Fluids (Oxic and Reduced) Model for the Formation of Uraninite in Early Proterozoic Quartz-Pebble Conglomerates of the Elliot Lake District, Ontario, Canada. *Mineralogical Magazine* **62A**: 1110-1111.

Moghazi, A.M., Hassanen, M.A., Mohamed, F.H. and **Ali, S.** (2004) Late Neoproterozoic strongly peraluminous leucogranites, south Eastern Desert, Egypt– petrogenesis and geodynamic significance. *Mineralogy and Petrology* **81**: 19-41.

Morris, D.E., Chisholm-Brause, C.J., Barr, M.E., Conradson, S.D. and **Eller, P.G.** (1994) Optical spectroscopic studies of the sorption of UO_2^{2+} species on a reference smectite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**: 3613-3623.

Nash, J.T., Granger, H.C. and **Adams, S.S.** (1981) Geology and concepts of genesis of important types of uranium deposits; *Econ. Geol.,* **75th** Anniversary Volume: 61-116.

Nesbitt, R.W., Pascual, E., Fanning, C.M., Toscan,o M., Sáez R. and **Almodóvar, G.R.** (1999) U-Pb dating of stockwork zircons from the eastern Iberian Pyrite Belt. *J. Geol. Soc. London* **156**: 7–10.

Nield, T. (2002) Beyond the forked twig. *Geoscientist* **12** (12): 2-7.

Nossier, L.M. (1996) U-F bearing episyenitized "desilicified" granitic rocks of Gabal Gattar, north Eastern Desert, Egypt. *Egyptian Academy of Sciences* **46**: 375-396.

Obrenovic, M., El Kassas, I.A.E. and **El-Amin, H.E.** (1966) Report on the results of detailed exploratory mining works at the uranium deposit of Wadi El Atshan locality, central Eastern Desert. Cairo, *Atomic Energy Establishment.*

OECD & IAEA (1998) *Uranium 1997 - Resources, Production and Demand.* Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency & International Atomic Energy Agency, Pub. by the OECD, 397p.

Ono, S. (2001) Detrital Uraninite and the Early Earth's Atmosphere: SIMS Analyses of Uraninite in the Elliot Lake District and the Dissolution Kinetics of Natural Uraninite. *Ph.D. Thesis,* the Pennsylvania State University.

Oreskes, N. and **Hitzman, M.W.** (1993) A model for the origin of Olympic Dam-type deposits. In: R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe and J.M. Duke, (ed.), *Mineral Deposits Modeling. Geol Assoc Can Spec Paper* **40**: 615-633.

Osmond, J.K. and **Cowart, J.B.** (1977) Uranium isotopes in groundwater: their use in prospecting for sandstone-type uranium deposits. *J. Geochem. Exploration* **8**: 365-379.

Osmond, J.K. (2003) Uranium-series fractionation in mafic extrusives. *Applied Geochemistry* **18**: 127–134.

Osmond, J.K., Dabous, A.A. and **Dawood, Y.H.** (1999) U series age and origin of two secondary uranium deposits, central Eastern Desert, Egypt. *Econ. Geol.* **94**: 273-280.

Pagel, M., Poty, B. and **Sheppard, M.F.S.** (1980) Contribution to some Saskatchewan uranium deposits mainly from fluid inclusion and isotopic data. In: IAEA (ed.), *Uranium in the Pine Creek Geosyncline, Vienna*: 639–645.

Plant, J.A., Simpson, P.R., Smith, B. and **Windley, B.F.** (1999) Uranium ore deposits-Products of the radioactive Earth. In: P.C. Burns and R. Finch, (ed.) Uranium: Mineralogy, geochemistry and the environment; Reviews in Mineralogy. *Mineral. Soc. Amer.* **38**: 255-319

Plumb, K.A. (1960) Results of diamond drilling 1959–1960 at Adelaide River uranium mine, Northern Territory. *Bureau of Mineral Resources Australia*, Record 1960/090.

Qadhi, T. (1990) *Unpublished Ph.D. Thesis,* Faculty of Earth Sciences, King Abdulaziz Univ., Jeddah, Saudi Arabia.

Read, D., Lawless, T.A. and **Sims, R.J.** (1993) Uranium migration through intact sandstone cores. *J. Contam. Hydrol.* **13**: 277-289.

Robinson, L.F., Belshaw, N.S. and **Henderson, G.M.** (2004) U and Th concentrations and isotope ratios in modern carbonates and waters from the Bahamas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68** (8): 1777-1789.

Roesener, H. and **Schreuder, C.P.** (1992) *Uranium. The Mineral Resources of Namibia, pg 7.1-1 to 7.1-55.* Published by the Ministry of Mines and Energy, and the Geological Survey, Republic of Namibia.

Romberger, S.B. (1984) Transportation and deposition of uranium in hydrothermal systems at temperatures up to 300°C: Geological implications. In: B.D. Vivo, F.I.G. Capaldi and P.R. Simpson, (ed.), Uranium geochemistry, mineralogy, geology, exploration and resources. *Institution of Mining and Metallurgy*, London: 12-17.

Rosholt, J.N. (1982) Mobilization and weathering. In: M. Ivanovich and R. Harmon, (ed.), *Uranium Series Disequilibrium: Application to Environmental Problems,* Clarendon Press: 167-179

Rosing, M.T. and **Frei, R.** (2004) U-rich Archaean sea-floor sediments from Greenland indications of > 3700 Ma oxygenic photosynthesis. *Earth and Planetary Science Letters* **217**: 237-244.

Roz, M.E. (1994) Geology and uranium mineralization of Gabal Gattar, north Eastern Desert, Egypt. *M.Sc. Thesis,* Cairo University, 175p.

Rubin, J.N., Henry, C.D. and **Price, J.G.** (1993) The mobility of zirconium and other immobile elements during hydrothermal alteration. *Chemical Geology* **110**: 29-47.

Ruzicka, V. (1971) Geological comparison between East European and Canadian uranium deposits. *Geol. Surv. Can., Pap. 70-48*, 195p.

Sadek, H.S. (1978) Relation between geology and areial radiometry of Abu Swayel area, Eastern Desert. *Ph.D. Thesis,* Cairo University, Egypt, 210p.

Salman, A.B., El Aassy, I.E. and **Shalaby, M.H.** (1986) New occurrence of uranium mineralization in Gabal Gattar, north Eastern Desert, Egypt. *Annals of Geological Survey of Egypt* **XVI**: 31-34.

Sassano, G.P. (1972) The nature and origin of the uranium mineralization at the Fay mine, Eldorado, Saskatchewan, Canada. *Unpublished Ph.D. Thesis,* Univ Alberta, Edmonton.

Sayed, K.F. (1996) Geochemistry of uranium and preparation of its refined concentrates from mineralized pink granites of G. Gattar and Um Ara areas, Eastern Desert, Egypt. *M.Sc.Thesis,* Ain Shams University, Egypt, 105p.

Sessler, J.L., Melfi, P.J. and **Pantos, G.D.** (2006) Uranium complexes of multidentate N-donor ligands. *Coord. Chem. Rev.* **250**: 816-843.

Shalaby, M.H. (1996) Structural controls of uranium mineralization at Gabal Gattar, north Eastern Desert, Egypt. *Egyptian Academy of Sciences* **46**: 521-536.

Sheppard, M.I., Thibault, D.H. and **Mitchell, J.H.** (1987) Element leaching and capillary rise in sandy soil cores. Experimental results. *J. Env. Qual.***16**: 273-284.

Sikalidis, C.A., Alexiades, C. and **Misaelides, P.** (1989) Adsorption of uranium and thorium from aqueous solutions by the clay minerals montmorillonite and vermiculite. *Toxicological and Environ-mental Chemistry* **20/21**:175-180.

Simpson, P.R. and **W. Bowles, J.F.** (1977) Uranium Mineralization of the Witwatersrand and Dominion Reef Systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 286, No. 1336, Mineralogy: Towards the Twenty-first Century (Sep. 12, 1977)*: 527-548

Sorg, T.J. (1991) Removal of uranium from drinking water by conventional treatment methods. In: C.R. Cothern, and P.A. Rebers, (ed.), *Radon, Radium and Uranium in Drinking Water. Chelsea (Michigan, USA), Lewis Publishers*, 173-191.

Suzuki, Y. and **Banfield, J.F.** (1999) Geomicrobiology of uranium. In: P.C. Burns and R. Finch, (ed.), Uranium: Mineralogy, geochemistry and the environment; Reviews in Mineralogy. *Mineral. Soc. Amer.* **38**: 393-432

Sylwester, E.R., Hudson, E.A. and **Allen, P.G.** (2000) The structure of uranium (VI) sorption complexes on silica, alumina, and montmorillonite. *Geochim. et Cosmochim. Acta* **64** (14): 2431-2438

Tarbuck, E. and **Lutgens, F.** (1984) The Earth, an Introduction to physical geology. *Charles E. Merrill Publishing Company.*

Towse, D.F. (1957) Uranium deposits in western North Dakota and eastern Mountana. *Economic Geology* **52** (8): 904-913.

Tsunashima, A., Brindley, G.W. and **Bastovanov, M.** (1981) Adsorption of uranium from solutions by montmorillonite; compositions and properties of uranyl montmorillonites. *Clays and Clays Minerals* **29**: 10-16.

Turkistany, A.R.A. and **Ramsay, C.R.** (1982) *Mineralized apogranite associated with alkali granite at Jabal Sa'id, Kingdom of Saudi Arabia.* Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Prof Pap. PP-1: 79-88.

Turner, G.D., Zachara, J.M., McKinley, J.P. and **Smith, S.C.** (1996) Surface-charge properties and UO_2^{2+} adsorption of a subsurface smectite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**: 3399-3414.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1991) *Radionuclides in Drinking Water Fact Sheet.* National Primary DrinkingWater Regulation for Radionuclides (EPA-570/9-91-700), Wahington.

Waite, T.D., Davis, J.A., Payne, T.E., Waychunas, G.A. and **Xu, N.** (1994) Uranium(VI) adsorption to ferrihydrite: Application of a surface complexation model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**: 5465-5478.

Walpole, B.P. (1957) The Adelaide River Uranium Mine, N.T. *Bureau of Mineral Resources, Australia*, Record 1957/058.

Wilde, A.R., Bloom, M.S. and **Wall, V.J.** (1989a) Transport and deposition of gold, uranium and platinum-group elements in unconformity-related uranium deposits. *Economic Geology Monograph* **6**: 637-650.

Wilde, A.R., Mernagh, T.P., Bloom, M.S. and **Hoffmann, C.F.** (1989b) Fluid inclusion evidence on the origin of some Australian unconformity-related uranium deposits. *Economic Geology* **84**: 1627-1642.

Williams, C.T., Bulakh, A.G., Gieré, R. Lumpkin, G.R. and **Mariano, A.N.** (2001) Alteration Features in Natural Zirconolite from Carbonatites. *Material Research Society Proceeding* **663**.

Willingham, T.O., Nagy, B., Nagy, L.A., Krinsley, D.H. and **Mossman, D.J.** (1985) Uranium-bearing stratiform organic matter in paleoplacers of the lower Huronian Supergroup, Eliot Lake-Blind River region, Canada. *Can. J. Earth Sci.* **22**: 1930-1944.

Zachara, J.M. and **McKinley, J.P.** (1993) Influence of hydrolysis on the sorption of metal cations by smectites: Importance of edge coordination reactions. *Aquatic Sciences* **55**: 250-261.

Ziegler, V. (1984) Uranium deposits in Europe. In: B. De Vivo, F. Ippolito, G. Capaldi, P.R. Simpson (ed.), *Uranium Geochemistry, Mineralogy, Exploration and Resources.* The Inst. Min. Metall., London, pp: 140-161.

Useful websites for further information

World Nuclear Association www.world-nuclear.org

International Atomic Energy Authority www.iaea.org

World Energy Council www.worldenergy.org

International Energy Agency www.iea.org

Cameco www.cameco.com

Cogema Resources www.cogema.ca

ERA (Energy Resources Australia) www.energyres.com.au

Nuclear Decommissioning Authority www.nda.gov.uk

British Energy Group Plc www.british-energy.com

UK Atomic Energy Authority www.ukaea.org.uk

British Nuclear Group (part of BNFL) www.nuclearsites.co.uk

ESO uranium Corp. www.esouramium.com

ثبت المصطلحات

(عربي- إنجليزي)

(أ)

أباتيت	apatite
أبيرناثيت	abernathyite
اتزان اشعاعى	radioactive equilibrium
إجرينيريت	agrinierit
أحماض دبالية	humic acids
ادمصاص اليورانيوم	uranium adsorption
أرسينيورانيليت	arsenuranylite
اسفين	sphene
إشعاع غير مؤين	non-ionizing radiation
إشعاع مؤين	ionizing radiation
أشعة اكس	X-rays
أشعة تحت حمراء	infrared radiation
أشعة جاما	gamma rays
أشعة فوق بنفسجية	ultraviolet radiation
اضمحلال بيتا	beta decay
أكتينيدات	actinides
أكسدة ذاتية	auto-oxidation
الألبتة	abitization
أنديرسونيت	andersonite
انصهار جزئي	partial melting
أنظمة مغلقة	closed systems
أوتونيت	autunite
أوكسي – بيتشيكيت	oxy-petschekite
إيانثينيت	ianthinite
إيريجنيت	iriginite
إيشيكاويت	ishikawaite
أيوكسينيت	euxenite
أيون اليورانيل	uranyl ion UO_2^{2+}
أيون اليورانيوم الرباعي	U(IV)
أيون اليورانيوم السداسي	U(VI)

(ب)

بارسونيت	parsonite
بازلت حيد منتصف المحيط	mid-ocean ridge basalt
بازيتيت	bassetite
برانيريت	brannerite
برزهيفالسكيت	przhevalskite
بروجيريت	brogerite
بولتووديت	boltwoodite
بولونيوم	polonium
بوليكراس	polycrase
بيتافيت	betafite
بيتشبلند	pitchblende
بيتشيكيت	petscheckeite
بيرتيت	piretite
بيرجينيت	bergenite
بيروكلور	pyrochlore
بيكريل	bequerel
بيكويرليت	becquerelite
بيليتيت	billietite

بيلييت bayleyite

بيئة قارية continental environment

(ت)

تانتالات اليورانيوم uranium tantalates

تحلل disintegration

تحوال سائلى metasomatism

تحوال قلوى alkali-metasomatism

تحول تهشمي cataclastic metamorphism

ترسيب مصاحب co-precipitation

ترسيب اليورانيوم uranium precipitation

تروجيريت troegerite

تسيبيت zippeite

تصنيف رواسب اليورانيوم classification of uranium deposits

تغاير ألبيتى أو صودي albitic or sodic alteration

تغاير بوتاسي potassic alteration

تغاير حديدى ferrugination

تغاير سيليكاتي silicification

تغاير طينى argilic alteration

تغاير كربوناتي carbonatization

تغاير بفعل المحاليل الحرمائية hydrothermal alteration

تفارق جيوكيمائى geochemical differentiation

تمايز صهيرى magmatic differentiation

تموضع emplacement

تنجستات اليورانيوم uranium tungstates

توربيرنيت torbernite

تيامونيت tyuyamunite

تيتانات اليورانيوم uranium titanates

تيلوريتيات اليورانيوم uranium tellurites

(ث)

ثوروجاميت thorogummite

ثيكوليت thucholite

(ج)

جاميت gummit

جريمسيليت grimselite

جزيئات ألفا alpha particles

جزيئات بيتا beta particles

جهد الأكسدة والاختزال redox potential

جوهانيت johannite

جويلمينيت guilleminite

(ح)

حد الذوبان solubility limit

حركية اليورانيوم uranium mobilization

حوض أثاباسكا Athabasca basin

حوض وتواترزراند Witwatersrand

(د)

دافيديت davidite

درجة الحامضية pH

درجة السمّيّة toxicity

دور البكتريا microbial role

دومونتيت dumontite

ديريكسيت derriksite
ديميسماكيريت demesmaekerite
ديوتيرون deuterium
ديوندتيت dewindtite

(ر)

رابيتيت rabbittite
رابيجاسيت rabejacite
راديوم radium
رازرفوردين rutherfordine
راميويت rameauite
راوفايت rauvite
رواسب التداخلات النارية intrusive deposits
رواسب الحجر الرملي sandstone deposits
رواسب يورانيوم الرول فرونت rollfront uranium deposits
رواسب الطفلة السوداء black shale deposits
رواسب العروق vein deposits
رواسب الفوسفوريت phosphorite deposits
رواسب اللجنيت lignite
رواسب المرقد placer deposits
رواسب المعقد القلوي alkaline complex deposits
رواسب اليورانيوم السطحية surficial uranium deposits
رواسب اليورانيوم المصاحبة لكنجلوميرات حبيبات الكوارتز quartz-pebble conglomerate uranium deposits
رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور الرسوبية uranium deposits of sedimentary rocks
رواسب أنابيب البريشيا المنهارة collapse breccia pipe deposits
رواسب بركانية volcanic deposits
رواسب تحوالية metasomatite deposits
رواسب روزينج Rössing deposits
رواسب سطحية surficial deposits
رواسب عدم التوافق unconformity-related deposits
رواسب مصاحبة للبيئة البحرية marin environment deposits
رواسب معقد البيريشيا breccia complex deposits
رواسب يورانيوم اللجنيت lignite uranium deposits
رينارديت renardite

(ز)

زركون zircon
زرنيخات اليورانيوم uranium arsenates
زيليريت zellerite
زينوتيم xenotime
زيونيريت zeunerite

(س)

سابوجاليت sabugalite
سالينيدات اليورانيوم uranium selenites
سامارسكيت samarskite
سكلودوويسكيت sklodowskite

Bowen's reaction series	سلسلة تفاعلات بوون
clevite	سليفيت
swartzite	سوارتزيت
sievert	سيفرت
saleeite	سيلييت
sengierite	سينجيريت

(ش)

sharpite	شاربيت
schroeckingerite	شروكينجيريت
shcmitterite	شميتيريت
shoepite	شوييت

(ص)

hydrous phase	صنف مائع
soddyite	صوددييت

(ع)

atomic number	عدد ذري
radioactive disequilibrium	عدم الاتزان الاشعاعى
jasperoid veins	عروق الجاسبار
leaching processes	عمليات الإذابة
digenetic processes	عمليات تحويرية

(ف)

walpurgite	فالبورجيت
vandenbrandeite	فاندينبراندايت
uranium vanadates	فانيدات اليورانيوم
vanuralite	فانيوراليت
pluvial periods	فترات مطيرة
half life time	فترة نصف العمر
francevillite	فرانسفيلليت
fourmarierite	فورماريت
uranium phosphates	فوسفات اليورانيوم
phosphuranylite	فوسفورانيليت

(ق)

continental crust	قشرة قارية
oceanic crust	قشرة محيطية

(ك)

uprosklodowskite	كابرو سكلودوويسكيت
carnotite	كارنوتيت
kasolite	كاسوليت
calcurmolite	كالكيورموليت
kahlerite	كاليريت
uranium sulfates	كبريتات اليورانيوم
uranium carbonate	كربونات اليورانيوم
cliffordite	كليفوردايت
curite	كوريت
coffinite	كوفينيت
coconinoite	كوكونينويت
chondrite	كوندريت

(ل)

dehydration	لاهدرجة
leibigite	ليبيجيت

(م)

مارثوزيت	marthozite
ماسيويت	masuyit
محاليل حرمائية	hydrothermal solutions
محاليل مياه الأمطار (المحاليل السطحية)	meteoric fluids
محفزات	catalysis
مستنقعات الخث	peat bogs
مسح إشعاعي جوي	Aeroradiometric survey
مسح طيفي أرضي لأشعة جاما	gamma-ray spectrometric survey
معادن اليورانيوم	uranium minerals
معادن سيليكات اليورانيوم	uranium silicates minerals
معقدات اليورانيوم	uranium complexes
معقدات اليورانيوم العضوية	urano-organic complexes
مكتنفات سائلة	inclusions fluid
مواد غروية	colloids
موكيتزيوميت	moctezumite
موليبدات اليورانيوم	uranium molybdates
موليورانيت	moluranite
ميتا يورانوسيرسيت	meta-uranocircite
ميتا–أوتونيت	meta-autunite
ميتا–أنكوليت	meta-ankoleite
ميتا–توربيرنيت	metatorbernite
ميتا–تيامونيت	metatyuyamunite
ميتا–زيونيريت	metazeunerite
ميتا–كيرشهايميريت	metakirchheimerite

(ن)

نشاط إشعاعي	radioactivity
نطق القص	shear zones
نظائر غير مستقرة	unstable isotopes
نظائر مستقرة	stable isotopes
نظير الأم	parent isotope
نظير الوليد	daughter isotope
نوفاسيكيت	novacekite
نيازك كوندريتية	condritic meteorite
نينجيويت	ningyoite
نيوبات اليورانيوم	uranium niobates

(هـ)

هاليمونديت	hallimondite
هاينيسيت	haynesite
هايوييت	haiweeite
هروب أو تسرب الأكسجين	oxygen fugacity
هينريشيت	heinrichite

(و)

وايرتيت	wyartite
وزن ذري	atomic weight
وشاح	mantle
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	IAEA
وكالة الطاقة النووية	NEA
ولسيندورفيت	wölsendorfit
ويكسيت	weeksite

(ي)

يورانوبيروكلور	urano-pyrochlore

يورانوبيليت	uranopilite	يورانينيت	uraninite
يورانوثوريت	uranothorite	يورانيوم حر	labile U
يورانوسبينيت	uranospinite	يوموهويت	umohoite
يورانوسفيريت	uranospherite	يورانيوم مكافيء	equivalent U
يورانوسيرسيت	uranocircite	يورانيوم منضب	depleted uranium
يورانوفان	uranophane	يوفانيت	uvanite

ثبت المصطلحات

(إنجليزي - عربي)

(A)

abernathyite	أبيرناثيت
albitization	الألبتة
actinides	أكتينيدات
aeroradiometric survey	مسح إشعاعي جوي
agrinierit	إجرينيريت
alkaline complex deposits	رواسب المعقد القلوي
alpha particles	جزيئات ألفا
andersonite	أنديرسونيت
apatite	أباتيت
argilic alteration	تغاير طينى
arsenuranylite	أرسينيورانيليت
Athabasca basin	حوض أثاباسكا
atomic number	عدد ذري
atomic weight	وزن ذري
auto-oxidation	أكسدة ذاتية
autunite	أوتونيت

(B)

bassetite	بازيتيت
beta decay	اضمحلال بيتا
beta particles	جزيئات بيتا
betafit	بيتافيت
black shale deposits	رواسب الطفلة السوداء
boltwoodite	بولتووديت
Bowen's reaction series	سلسلة تفاعلات بوون
brannerite	برانيريت
breccia complex deposits	رواسب معقد البيريشيا
brogerite	بروجيريت

(C)

calcurmolite	كالكيورموليت
carbonatization	تغاير كربوناتي
carnotite	كارنوتيت
catalysis	محفزات
chondrite	كوندريت
clevite	سليفيت
cliffordite	كليفوردايت
closed systems	أنظمة مغلقة
coconinoite	كوكونينويت
coffinite	كوفينيت
collapse breccia pipe deposits	رواسب أنابيب البريشيا المنهارة
colloids	مواد غروية
condritic meteorite	نيازك كوندريتية
continental crust	قشرة قارية
cuprosklodowskite	كابروسكلودوويسكيت
curite	كوريت

(D)

daughter isotope	نظير الوليد
davidite	دافيديت

heinrichite هينريشيت
humic acids أحماض دبالية
hydrothermal alteration تغاير بفعل المحاليل الحرمائية
hydrothermal solutions محاليل حرمائية
hydrous phase صنف مائع

(I)

IAEA الوكالة الدولية للطاقة الذرية
ianthinite إيانثينيت
inclusions fluid مكتنفات سائلة
infrared radiation أشعة تحت حمراء
intrusive deposits رواسب التداخلات النارية
ionizing radiation إشعاع مؤين
iriginite إيريجنيت
ishikawaite إيشيكاويت

(J)

jasperoid veins عروق الجاسبار
johannite جوهانيت

(K)

kahlerite كاليريت
kasolite كاسوليت

(L)

labile U يورانيوم حر
leaching processes عمليات الإذابة
leibigite ليبيجيت
lignite uranium deposits رواسب يورانيوم اللجنيت

dehydration لاهدرجة
demesmaekerite ديميسماكيريت
depleted uranium يورانيوم منضب
derriksite ديريكسيت
deuterium ديوتيرون
dewindtite ديوندتيت
digenetic processes عمليات تحويرية
dumontite دومونتيت

(E)

emplacement تموضع
equivalent U يورانيوم مكافيء
euxenite أيوكسينيت

(F)

francevillite فرانسفيلليت
fourmarierite فورماريت

(G)

gamma rays أشعة جاما
gamma-ray spectrometric survey مسح طيفي أرضي لأشعة جاما
geochemical differentiation تفارق جيوكيمائى
guilleminite جويلمينيت
gummit جاميت
grimselite جريمسيليت

(H)

haiweeite هايوييت
half life time فترة نصف العمر
hallimondite هاليمونديت
haynesite هاينيسيت

oxygen fugacity هروب أو تسرب الأكسجين

oxy-petschekite أوكسي–بيتشيكيت

(P)

parent isotope نظير الأم

parsonite بارسونيت

partial melting انصهار جزئي

peat bogs مستنقعات الخث

pH درجة الحامضية

phosphorite deposits رواسب الفوسفوريت

phosphuranylite فوسفورانيليت

pitchblende بيتشبلند

placer deposits رواسب المرقد

pluvial periods فترات مطيرة

polonium بولونيوم

polycrase بوليكراس

przhevalskite برزهيفالسكيت

(Q)

quartz-pebble conglomerate uranium deposits رواسب اليورانيوم المصاحبة لكونجلميرات حبيبات الكوارتز

(R)

rabbittite رابيتيت

rabejacite رابيجاسيت

radium راديوم

radioactive disequilibrium عدم الاتزان الاشعاعى

radioactive equilibrium اتزان اشعاعى

radioactivity نشاط إشعاعى

(M)

magmatic differentiation تمايز صهيرى

mantle وشاح

marin environment deposits رواسب مصاحبة للبيئة البحرية

marthozite مارثوزيت

masuyit ماسيويت

meta-ankoleite ميتا–أنكوليت

metatorbernite ميتا–توربيرنيت

metatyuyamunite ميتا–تيامونيت

meta-autunite ميتا–أوتونيت

metakirchheimerite ميتا–كيرشهايميريت

metasomatite deposits رواسب تحوالية

meta-uranocircite ميتا يورانوسيرسيت

metazeunerite ميتا–زيونيريت

meteoric fluids محاليل مياه الأمطار

microbial role دور البكتريا

mid-ocean ridge basalt بازلت حيد منتصف المحيط

moctezumite موكيتزيوميت

moluranite موليورانيت

(N)

NEA وكالة الطاقة النووية

ningyoite نينجيويت

non-ionizing radiation إشعاع غير مؤين

novacekite نوفاسيكيت

(O)

oceanic crust قشرة محيطية

rameauite راميويت
rauvite راوفايت
redox potential جهد الأكسدة والاختزال
renardite رينارديت
Rollfront uranium deposits رواسب يورانيوم الرول فرونت
Rössing deposits رواسب روزينج
rutherfordine رازرفوردين

(S)

sabugalite سابوجاليت
saleeite سيلييت
samarskite سامارسكيت
sandstone deposits رواسب الحجر الرملي
schroeckingerite شروكينجيريت
shear zones نطق القص
sengierite سينجيريت
sharpite شاربيت
shcmitterite شميتيريت
Shoepite شوبييت
sievert سيفرت
silicification تغاير سيليكاتي
sklodowskite سكلودوويسكيت
soddyite صوديبت
solubility limit حد الذوبان
sphene اسفين
stable isotopes نظائر مستقرة
surficial deposits رواسب سطحية
surficial uranium deposits رواسب اليورانيوم السطحية
swartzite سوارتزيت

(T)

thorogummite ثوروجاميت
thucholite ثيكوليت
torbernite توربيرنيت
toxicity درجة السمّيّة
tyuyamunite تيامونيت

(U)

U(IV) أيون اليورانيوم الرباعي
U(VI) أيون اليورانيوم السداسي
ultraviolet radiation أشعة فوق بنفسجية
umohoite يوموهويت
unconformity-related deposits رواسب عدم التوافق
unstable isotopes نظائر غير مستقرة
uranium adsorption ادمصاص اليورانيوم
uranium arsenates زرنيخات اليورانيوم
uranium carbonate كربونات اليورانيوم
uranium complexes معقدات اليورانيوم
uranium deposits of sedimentary rocks رواسب اليورانيوم المصاحبة للصخور الرسوبية
uranium minerals معادن اليورانيوم
uranium mobilization حركية اليورانيوم
uranium molybdates موليبدات اليورانيوم
uranium niobates نيوبات اليورانيوم
uranium phosphates فوسفات اليورانيوم

uranium selenites سالينيدات اليورانيوم

uranium silicates minerals معادن سيليكات اليورانيوم

uranium sulfates كبريتات اليورانيوم

uranium tellurites تيلوريتيات اليورانيوم

uranium titanates تيتانات اليورانيوم

uranium tungstates تنجستات اليورانيوم

uranium vanadates فانيدات اليورانيوم

urano-organic complexes معقدات اليورانيوم العضوية

uranophane يورانوفان

uraninite يورانينيت

uranopilite يورانوبيليت

uranothorite يورانوثوريت

urano-pyrochlore يورانوبيروكلور

uranospherite يورانوسفيريت

uranocircite يورانوسيرسيت

uranospinite يورانوسبينيت

uranyl ion UO_2^{2+} أيون اليورانيل

uvanite يوفانيت

(V)

vandenbrandeite فاندينبراندايت

vanuralite فانيوراليت

vein deposits رواسب العروق

volcanic deposits رواسب بركانية

(W)

walpurgite فالبورجيت

weeksite ويكسيت

Witwatersrand حوض وتواترزراند

wölsendorfit ولسيندورفيت

wyartite وايرتيت

(X)

xenotime زينوتيم

X-rays أشعة اكس

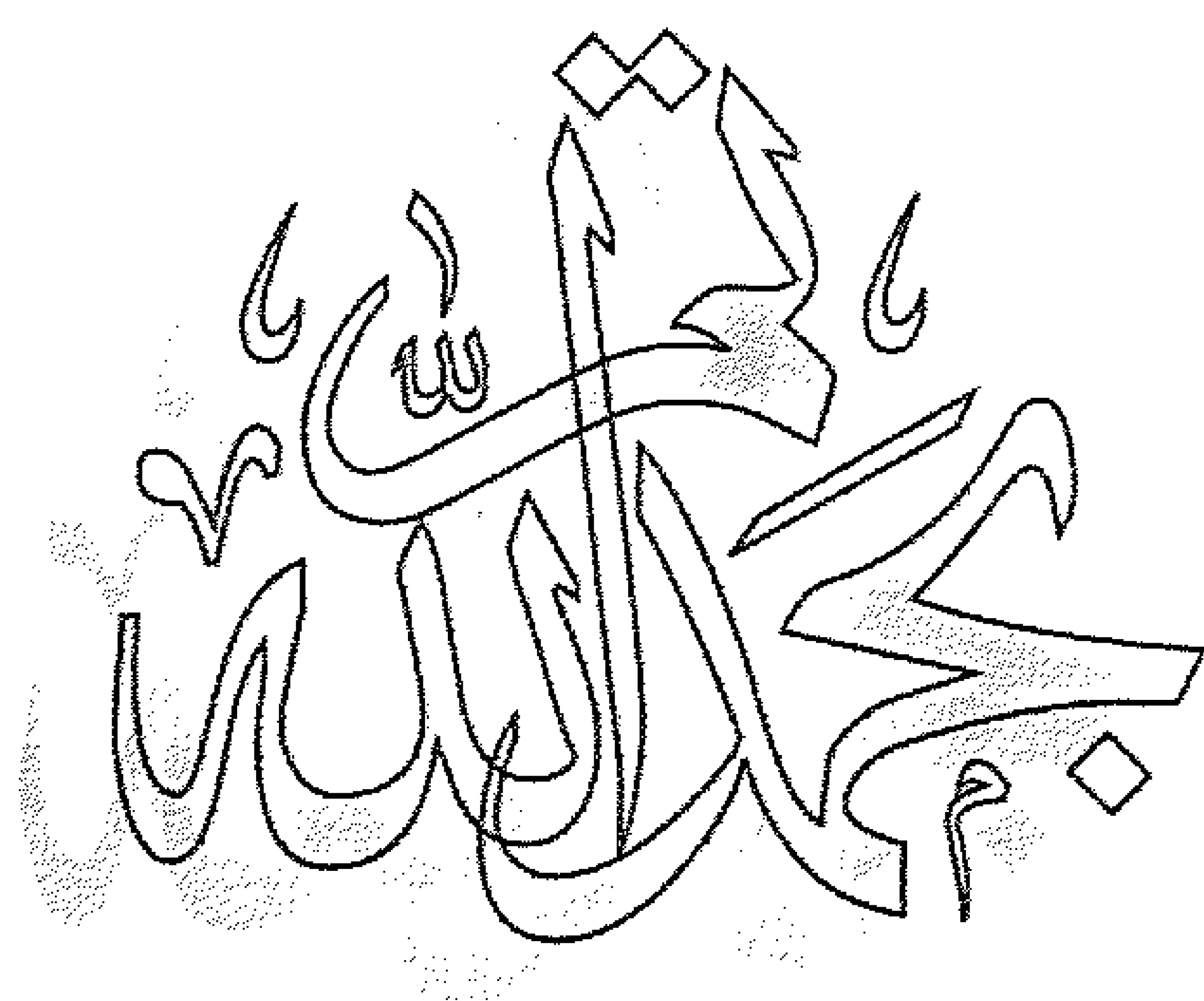
(Z)

zellerite زيليريت

zeunerite زيونيريت

zircon زركون

كشّاف الموضوعات



مطابع جامعة الملك عبدالعزيز



المملكة العربية السعودية

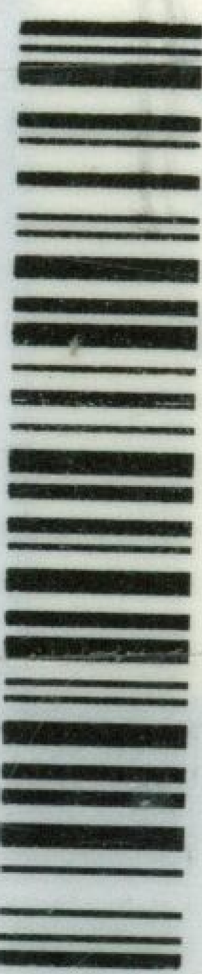


- **الدكتور حمدى حامد عبدالنبى يوسف**

أستاذ جيوكيمياء المعادن والصخور

- تخرج من جامعة عين شمس في مصر عام ١٩٨٥م،
- حصل على درجة الماجستير في الجيولوجيا من جامعة عين شمس في عام ١٩٩٤م.
- حصل على درجة الدكتوراه في الجيولوجيا من معهد الجيولوجيا، جامعة توبنجن، ألمانيا في عام ١٩٩٨م.
- عمل معيداً بهيئة المواد النووية منذ عام ١٩٩٠م، ورقي إلى مرتبة مدرس مساعد في عام ١٩٩٤م، وإلى مرتبة أستاذ مساعد في عام ١٩٩٨م، وإلى مرتبة أستاذ مشارك في عام ٢٠٠٤م، وإلى مرتبة أستاذ في الجيوكيمياء في عام ٢٠٠٩م.
- اشترك في الكثير من المشاريع المدعمة، وغير المدعمة، بمصر والمملكة العربية السعودية. كما ساهم في عدد من المؤتمرات الوطنية والعالمية.
- نشر العديد من الأبحاث في المجلات العلمية العالمية في مجال جيوكيمياء المعادن والصخور. وشارك في تأليف العديد من الكتب العلمية.
- يعمل حالياً أستاذاً، ومنذ عام ٢٠٠٣م، في قسم الثروة المعدنية والصخور، كلية علوم الأرض، جامعة الملك عبد العزيز.

إن الدافع الأساسي لهذا الكتاب هو إبراز المعلومات الخاصة بجيولوجية رواسب اليورانيوم باللغة العربية، حتى يتسنى لراغبي المعرفة فهم خبايا هذا العلم. ومن المأمول أن يخدم هذا الكتاب طلاب الاستكشاف الجيولوجي، والخريجين الذين يشتغلون بالأبحاث في مجال رواسب اليورانيوم، والذين يرغبون في الحصول على معلومات وأفكار عامة عن النشاط الإشعاعى، وخصائص اليورانيوم الجيوكيميائية، وسلوكه في الأوساط المختلفة، والتعرف على ال... المختلفة من معادن اليورانيوم، كما يحتوي على أمثلة من رواسب اليورانيوم المص... للأنواع المختلفة من الصخور. هذا والله أسأل أن يكون العمل قد استكمل في ال... المرجوة حتى يحقق الهدف المأمول منه.



ردمك : ٩٧٨-٩٩٦٠-٠٦-٥٤٧-٢

مطابع جامعة الملك عبدالعزيز